



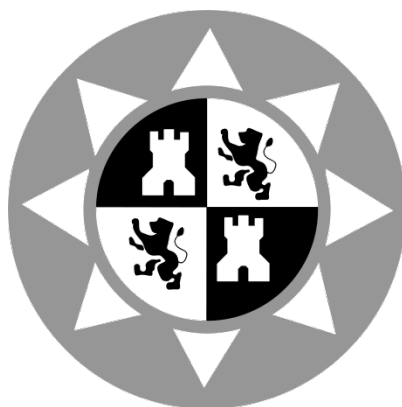
Universidad Politécnica de Cartagena
Departamento de Tecnologías de la Información y las
Comunicaciones

**Estudio de la compensación magnética de
plataformas navales. Compensación de la
anomalía producida en el campo magnético
terrestre mediante algoritmos genéticos.
Análisis y compensación de anomalías
magnéticas locales.**

(Tesis Doctoral)

Antonio Villalba Madrid

2.015



Universidad Politécnica de Cartagena
Departamento de Tecnologías de la Información y las
Comunicaciones



**Estudio de la compensación magnética de
plataformas navales. Compensación de la
anomalía producida en el campo magnético
terrestre mediante algoritmos genéticos.
Análisis y compensación de anomalías
magnéticas locales.**

Antonio Villalba Madrid

Director
Alejandro Álvarez Melcón

2.015



**CONFORMIDAD DE SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN DE DEPÓSITO DE
TESIS DOCTORAL POR EL/LA DIRECTOR/A DE LA TESIS**

D./D^a. ALEJANDRO MELCON ALVAREZ Director/a de la Tesis doctoral “Estudio de la compensación magnética de plataformas navales. Compensación de la anomalía producida en el campo magnético terrestre, mediante algoritmos genéticos. Análisis y compensación de anomalías magnéticas locales”

INFORMA:

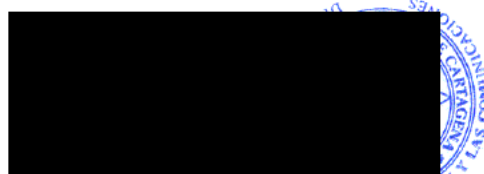
Que la referida Tesis Doctoral, ha sido realizada por D./D^a. ANTONIO VILLALBA MADRID, dentro del programa de doctorado TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIONES dando mi conformidad para que sea presentada ante la Comisión de Doctorado para ser autorizado su depósito.

La rama de conocimiento en la que esta tesis ha sido desarrollada es:

Ciencias
Ciencias Sociales y Jurídicas
Ingeniería y Arquitectura X

En Cartagena, a 4 de SEPTIEMBRE de 2015

EL/LA DIRECTOR/A DE LA TESIS



Fdo.: ALEJANDRO ALVAREZ MELCON

COMISIÓN DE DOCTORADO



**CONFORMIDAD DE DEPÓSITO DE TESIS DOCTORAL
POR LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA**

D/D^a. FERNANDO DANIEL QUESADA PEREIRA, Presidente de la Comisión Académica del Programa TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y COMUNICACIONES.

INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada, “Estudio de la compensación magnética de plataformas navales. Compensación de la anomalía producida en el campo magnético terrestre mediante algoritmos genéticos. Análisis y compensación de anomalías magnéticas locales”, ha sido realizada, dentro del mencionado programa de doctorado, por D/D^a. ANTONIO VILLALBA MADRID, bajo la dirección y supervisión del Dr/ Dra. ALEJANDRO ÁLVAREZ MELCÓN.

En reunión de la Comisión Académica de fecha 08/09/2015, visto que en la misma se acreditan los indicios de calidad correspondientes y la autorización del Director de la misma, se acordó dar la conformidad, con la finalidad de que sea autorizado su depósito por la Comisión de Doctorado.

La Rama de conocimiento por la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- ☐ Ciencias
- ☐ Ciencias Sociales y Jurídicas
- ☒ Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 08 de SEPTIEMBRE de 2.015

EL PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA



Fdo: -FERNANDO DANIEL QUESADA PEREIRA-

COMISIÓN DE DOCTORADO

Agradecimientos

El trabajo que se presenta es el resultado de los estudios que se realizaron para mejorar las técnicas tradicionales de minimización de la firma magnética de buques tanto en campo lejano como cercano. Su inicio, desarrollo y base técnica han estado sustentados por cinco pilares fundamentales que han llevado nuestra larga travesía a buen puerto.

Todo comenzó a principios del nuevo siglo cuando en los cursos de doctorado tuve la oportunidad de conocer al Dr. Alejandro Álvarez. Él fue quién me propuso iniciar esta expedición de futuro incierto. Aunque me resistí en un principio, sabía que disponíamos del conocimiento necesario y acepté el reto. El apoyo de los compañeros del Departamento, y de la Politécnica de Valencia, Benito y Vicente, fue determinante.

Para el viaje fue fundamental la experiencia adquirida en la Estación de Calibración Magnética que la Armada Española tiene en sus instalaciones de Cartagena. En este departamento me desarrollé profesionalmente entre los años 1.998 y 2.010, donde participé en su modernización, comenzando por la digitalización de señales y finalizando por la implementación de los algoritmos de minimización. La mejora de los mismos ha sido la base de esta apasionante empresa.

En una de las escalas, no previstas, y obligada ante la necesidad de saber más sobre anomalías magnéticas a bordo, llegamos a la Base Naval de Norfolk. Allí aprendí sobre técnicas de desmagnetización junto al personal de la Estación de Calibración Magnética y de la Estación de Deperming de *Lambert Point*, fundamentalmente con su responsable, Helen Shiftbauer.

Durante mis guardias de puente tuve el apoyo de mis compañeros de tripulación. A unos les agradezco la valoración que siempre hicieron de los estudios realizados sobre la magnetización de cubiertas de vuelo; en especial a ti, Joaquín, que hace tiempo que te fuiste y no pude despedirme como me hubiera gustado. Al personal de la sala de máquinas, el *C.E.M.C.A.M.*, por su colaboración en los trabajos de campo. Al personal del *R.E.E.* que me ha dado la luz y el aliento necesario para el último tránsito, el más difícil por la niebla y la mar de fondo existente. A Gregorio, que con sus consejos me hizo avanzar en la dirección más adecuada.

En mis momentos de descanso, en mi camarote, he recordado siempre la labor de mis padres, Antonio y María Dolores, que me enseñaron el valor del estudio, la responsabilidad y la constancia. Y, como no podía ser de otro modo, a los más pacientes, mi mujer, Maite, y mi hijo, Álvaro: ¡Gracias por vuestro apoyo!.

Una vez atracado en puerto seguro y completada la misión, firmo y entrego este cuaderno de bitácora para su custodia en Cartagena, a primero de septiembre de dos mil quince.

Antonio Villalba Madrid

Resumen

En esta Tesis se recopilan una serie de técnicas para la minimización de la anomalía magnética que produce un buque en el campo magnético terrestre. Dichas técnicas se han centrado en la reducción de la influencia que un buque tiene sobre el campo magnético terrestre en el entorno de su posición y en la minimización de la influencia magnética de las magnetizaciones del buque en las operaciones de vuelo sobre la cubierta.

La primera parte de la Tesis está orientada al uso de nuevos algoritmos de minimización de la anomalía en el campo magnético terrestre que producen las magnetizaciones del buque. En concreto se ha centrado en la aplicación de los Algoritmos Genéticos. La compensación de esta influencia sobre el campo magnético terrestre se realiza mediante un campo magnético de signo contrario generado por las diferentes bobinas que componen el sistema de desmagnetización propio del buque.

Un sistema de desmagnetización o sistema de *degaussing* puede presentar diferentes configuraciones dependiendo de la disposición de las bobinas, su número y el tipo de control de la corriente responsable de crear el campo magnético de compensación. En general, un sistema completo tiene bobinas para compensar las componentes del campo magnético estático vertical, longitudinal y transversal, tanto permanente como inducido.

En general, el procedimiento de minimización de las anomalías magnéticas producidas por un buque en el campo magnético terrestre se realiza en polígonos de calibración denominados *open range*, dónde los buques bajo calibración realizan evoluciones a rumbo y velocidad constantes y perpendiculares a una línea de sensores. En este tipo de polígonos existen una serie de factores que producen errores en el proceso de calibración. Son los siguientes:

- La variabilidad temporal del campo magnético terrestre en la zona, es decir, el ruido ambiente del campo magnético.
- El ruido propio del sistema de medida.
- Los efectos de la cabezada y el balanceo durante la pasada.
- La variación de rumbo del buque durante las pasadas.
- La posición en superficie del buque respecto de los sensores.
- Imprecisiones de lectura de los magnetómetros.
- Imprecisiones en el modelo de buque utilizado para extraer las componentes del campo magnético.
- No linealidades del material magnético en el punto de trabajo. Los buques de acero y los diferentes sistemas que se montan en su interior tienen propiedades ferromagnéticas y el campo magnético total va a variar dentro de una zona lineal proporcional al campo magnético de la tierra.

En la primera parte de la Tesis se desarrolla un método novedoso basado en los Algoritmos Genéticos (GAS) para calcular los valores de corriente y número de espiras

necesarios para la compensación en un procedimiento iterativo de pasadas por una estación de calibración. Según los autores ésta es la primera vez que este tipo de algoritmos se usan para la calibración magnética de un buque. Diferentes mecanismos de selección, estrategias de la función objetivo y métodos de escalado han sido evaluados, y sus ventajas e inconvenientes han sido expuestos incluyendo la velocidad de convergencia de cada configuración. Los resultados obtenidos muestran que la técnica empleada es muy eficiente, y puede ser empleada para una rápida y óptima calibración magnética de un buque.

Además, se ha diseñado una novedosa función objetivo para evitar que la minimización genere rizados en torno a la función objetivo. El uso de funciones objetivo como los mínimos cuadrados implicaría que el propio sistema de desmagnetización del buque generaría artificialmente un campo magnético que posteriormente debería ser compensado. Dicho campo magnético produciría un elevado gradiente y sería una señal inequívoca de la presencia de un buque en la zona de influencia. Este nuevo método se ha denominado método de *Contención*, y con él se han conseguido reducciones de la perturbación magnética de hasta un 95% y, de su gradiente de hasta un 75%, frente a otros métodos como los que utilizan funciones objetivo basadas en mínimos cuadrados (reducción del 75% del nivel y empeoramiento del gradiente entorno al 20%).

En algunos casos una compensación global de la influencia magnética (calibración magnética) no garantiza la compensación local en ciertas zonas del buque dónde puede tener influencias no deseadas en sensores de tipo magnético. Este tipo de situaciones son objetivo de la segunda parte de la Tesis. Para estudiar esto, se ha desarrollado un procedimiento para la medida, estudio y compensación de anomalías magnéticas, que incluye la elaboración de un dispositivo para la adquisición sistemática del campo magnético existente en los diferentes puntos de un mallado.

La solución tradicional a este nivel de campo magnético local no deseado es la aplicación de una desmagnetización global al buque. Esta desmagnetización o *deperming* consiste en rodear a la plataforma completamente con un cable conductor por el que se hace pasar entre 500 y 1.500 amperios por metro, referida esta longitud a la separación de las espiras de corriente. Este proceso de compensación magnética presenta los siguientes inconvenientes:

- Instalaciones costosas de mantener.
- El cableado necesita entre 50 y 200 personas para su montaje, dependiendo del desplazamiento¹ del buque.
- El riesgo es elevado por la magnitud de la corriente que circula por las espiras (varios miles de amperios).

Por todo esto, en el caso de una anomalía magnética local se propone un procedimiento original basado en tres actuaciones novedosas:

¹ El desplazamiento de un buque (Δ) es el peso del agua desalojada en su flotabilidad según el Principio de Arquímedes.

- Elaboración de una herramienta que permita el levantamiento sistemático y automatizado de un mapa magnético en superficies ferromagnéticas. Actualmente no existe en el mercado una herramienta similar para este tipo de aplicaciones.
- Implementación de un procedimiento de evaluación de los datos que permita establecer la existencia de una anomalía magnética cuando se trabaja en estructuras ferromagnéticas.
- Resolución con una configuración de bobinas discretas una anomalía magnética localizada cuando se conozca la fuente que la produce o sea imposible de actuar sobre la fuente.

Se presentan los resultados obtenidos en cuatro plataformas para demostrar la efectividad de la nueva estrategia desarrollada para la medida, análisis y compensación de anomalías magnéticas locales.

Abstract

In this thesis I collect a sequence of techniques for the minimization of the magnetic anomalies produced by a vessel in the Earth's magnetic field. These techniques have been focused in the reduction of the influence of a vessel in the Earth's magnetic field measured by sensors in the vicinity of the environment of the vessel's position and on the minimization of the magnetic influence of the magnetizations of the vessel in the platform's sensors.

The first part of the Thesis is focused to the use of the Genetics Algorithms (GAs) to compensate the perturbation in the Earth's magnetic field of the magnetizations of the vessels. The compensation of this anomaly is obtained by a degaussing system's coils installed in the vessels. These coils are used for the compensation in three axis of the local magnetic perturbation produced by a vessel when it moves inside the Earth's magnetic field.

A System of demagnetization can give several configurations depending on the disposition of the coils, its number and the control of the current responsible for creating the magnetic field of compensation. Normally, a complete system has coils to compensate the vertical static magnetic field, the longitudinal and transversal components, as well as the permanent and the induced magnetic field contributions.

Generally, the procedure of minimization of the magnetic anomalies produced by a vessel is performed with a set of calibrations called "open range", where the vessels under calibrations perform evolutions to following different paths along some lines of sensors. In this type of calibration there are some series of factors that produce errors in the process of calibration. They are the following:

- The temporal variability of the magnetic field of the Earth in the zone, namely the environmental noise of the magnetic field.
- The noise generated by the own measurement system.
- The effects of the pitch and roll during the calibration process.
- The variation of heading of the vessel during the running.
- The position of the vessel with respect of the sensors.
- Imprecisions of lecture of the magnetometers.
- Imprecisions in the model of the vessel used to extract the components of the magnetic field.
- Nonlinearities of the magnetic material in the point of measurement. The vessels and the components inside have ferromagnetic properties. The magnetic field perturbation measured in a given range will vary linearly proportional to the Earth's magnetic field.

In the first part of the Thesis a new method has been developed based in the GA's to calculate the values of current and number of turns required for each compensation with iterative algorithms. According to the authors this is the first time that this type of algorithms has been used to the magnetic calibration of a vessel. Different mechanisms of selection, objective function's strategies and methods of scaling have been evaluated. Its pros and cons have been shown including the speed of convergence of each option. Results obtained show that the technique used is very efficient, and can be used for a quick and better magnetic calibration of a vessel as compared to currently used techniques.

Also, It has been designed a new objective function to avoid that the minimization process generates ripples around the objective function. That would indicate that the system of demagnetization of the vessel creates artificially its own magnetic field that later on should also be compensated. That compensated magnetic field would involve a higher gradient and would be an indication of the presence of a vessel in the influence zone. This new method has been called the boundary method, and with it we have achieved reductions of the magnetic signature of 95% and of its gradient of 75% against traditional methods based on minimum squares.

In some cases the global compensation of the magnetic perturbation or magnetic calibration does not guarantee compensation in certain local areas of the ship where you can have unwanted influences in magnetic sensors. This type of situations is the objective of the second part of the Thesis. For that a procedure for its study and its resolution has been developed, that includes also the fabrication of a novel device for a systematic acquisition of magnetic data.

The traditional solution to this unwanted local magnetic perturbation is the application of a global demagnetization to the vessel (also call deperming). This demagnetization consists in winding completely the platform with a conductor cable for which it acts between 500 and 1500 Amps per meter referred to the separation of the coils. This process of magnetic compensation presents the following problems:

- Expensive facilities to maintain.
- The complete wires need between 50 and 200 persons for its maintenance depending on the displacement of the vessel (length).
- The risk is really high because of the high magnitude of the current that goes through the spirals (some thousands of Amps)

Due to all these factors, in the case of a local magnetic anomaly we propose an original procedure based in three new actuations:

- Implementation of a tool that allows the systematic acquisition of a magnetic map in ferromagnetic surfaces. Actually it does not exist in the market a similar tool of this type that can be used for this application.
- Elaboration of a procedure to evaluate magnetic data and to allow the detection of a magnetic anomaly in ferromagnetic structures.
- Compensate the magnetic local anomaly with several coils around the magnetic source.

Results are presented for the compensation of local anomalies in several naval platforms. They indicate that the new technique is indeed effective and leads to a considerable reduction in the local anomalies treated, considering real scenarios.

Índice General

1	Introducción.....	1
1.1	Generalidades	1
1.2	Objetivos de la Tesis	4
1.3	Contenido de la Tesis	5
1.4	Contribuciones originales de la Tesis.....	6
2	Magnetización de un buque y su medida	9
2.1	Introducción	9
2.2	La magnetización de un buque y la medida de la densidad de flujo magnético	9
2.3	Modelo magnético de un buque	20
2.4	Modelo Dipolar Simple del buque	21
2.5.	Representación matricial del MDS	24
3	Sistema de Desmagnetización.....	35
3.1.	Introducción	35
3.2.	Caracterización de un Sistema de Desmagnetización	35
3.3.	Efectos Bobina	38
3.3.1	Espira Plana XY	39
3.3.2	Hilo Finito	44
3.4.	Compensación magnética y corrientes de equilibrio.....	46
4	Aplicación de los Algoritmos Genéticos a la compensación magnética.....	51
4.1.	Introducción	51

4.2.	Tipo de Algoritmo Genético utilizado	52
4.3.	Aplicando GAS a la compensación magnética de un buque.....	59
4.4.	Resultados	64
4.5.	Conclusiones	73
5	Compensación de anomalías magnéticas locales en cubiertas de vuelo	75
5.1	Introducción	75
5.2	Diseño e implementación del dispositivo de captación mono-sensor de campo magnético	76
5.2.1	Características del captor	76
5.2.2	Características de la caja de conexionado y alimentación	77
5.2.3	Características del soporte de aluminio.....	78
5.2.4	Características del soporte de orientación.....	79
5.3	Procedimiento de medida	80
5.4	Levantamiento del mapa magnético de la plataforma <i>P1</i>	82
5.5	Evaluación de resultados	86
5.6	Conclusiones	98
6	Levantamiento de mapas magnéticos locales con dispositivo multi-sensor	99
6.1	Introducción	99
6.2	Diseño de un dispositivo de captura semiautomático multi-sensor	99
6.2.1	Diagrama de bloques.....	99
6.2.2	Plataforma de medida.....	101
6.2.3	Software de captura.....	102
6.3	Procedimiento de medida	105
6.4	Levantamiento del mapa magnético de la Plataforma <i>P2</i>	107
6.4.1.	Mapas 2D	111
6.4.2.	Análisis de resultados.....	116

6.5	Levantamiento de mapas magnéticos en Plataformas móviles.....	119
6.5.1.	Mapa Magnético permanente de la Plataforma <i>P3</i>	122
6.5.2.	Análisis de resultados.....	130
6.6	Mapa Magnético permanente de la plataforma <i>P4</i>	133
6.6.1.	Análisis de resultados.....	140
6.7.	Conclusiones	142
7	Estudio comparativo de mapas magnéticos	143
7.1	Introducción.....	143
7.2	Descripción del procedimiento.....	143
7.3.	Promediado por filas.....	146
7.4.	Promediado por columnas.	149
7.5.	Error de rumbo.....	152
7.6.	Clasificación de las anomalías magnéticas.....	154
7.7.	Compensación de la anomalía magnética local	159
7.7.1.	Compensación sobre la fuente.....	160
7.7.2.	Compensación sobre la Plataforma	165
7.8.	Conclusiones.....	168
8	Conclusiones de la Tesis y líneas futuras	171
8.1	Conclusiones.....	171
8.2.	Líneas futuras	174
A	Deperming & Wiping.....	175
B	Levantamiento mapa magnético de una cubierta de vuelo.....	181
C	Características técnicas de la electrónica del sistema de medida multi-sensor.....	185
D	Tablas de datos de los mapas magnéticos	189
E	Publicaciones relacionadas con las tesis	207
E.1	Publicaciones en revistas.....	207

E.2 Publicaciones en congresos.....	207
E.2.1. Publicaciones en congresos nacionales.....	207
E.2.2. Publicaciones en congresos internacionales.....	208
Bibliografía	209
Índice de Figuras	211
Índice de Tablas.....	219

Capítulo 1

Introducción

1.1 Generalidades

Todo elemento, sistema o material ferromagnético produce en su entorno más próximo una variación de la densidad del flujo magnético existente. En el caso de grandes estructuras ferromagnéticas, como buques de superficie y submarinos, ésta variación en el campo magnético terrestre es detectable por sensores externos específicos. Localmente una magnetización de algún componente interno del buque puede influir en sensores propios o de ciertas unidades que de forma permanente o temporal hacen uso de la plataforma (aeronaves). Las perturbaciones magnéticas locales y su compensación es de aplicación también a zonas de aterrizaje en localizaciones dónde existan elementos que pueden causar una anomalía en la instrumentación de rumbo de las aeronaves que hagan uso de las mismas. Como ejemplos de sensores que pueden tener funcionamientos anormales por anomalías magnéticas podemos nombrar sensores de apertura-cierre de puertas, sensores de posición, sensores de rumbo,..., etc.

Los estudios que se van a desarrollar se centrarán en plataformas navales ya sean buques de superficie o submarinos. Tanto la magnetización global de un buque como la magnetización localizada en alguna zona del mismo son dos situaciones reales que se presentan dentro de las operaciones de establecimiento del silencio magnético (indetectabilidad por sensores externos al paso por las inmediaciones de un dispositivo de captación) [1]. La compensación de la plataforma en su conjunto para obtener un silencio magnético y la compensación local de una magnetización puntual son los dos puntos de partida de los estudios que forman parte de esta Tesis doctoral.

Una solución “drástica” para el silenciamiento magnético es la desmagnetización o *deperming* del buque [2]. Este tipo de métodos utilizan unas infraestructuras muy costosas y fueron muy utilizadas a principio del siglo pasado por las grandes potencias navales. El uso de estos métodos también ha estado relacionado con el coste del cobre ya que la instalación de

un sistema de auto compensación dentro del buque elevaba el coste de la plataforma. En el anexo A se describe el procedimiento de *deperming* de un buque. En la figura 1.1 puede verse la Fragata F101 “Álvaro de Bazán” en la estación de *deperming* de Lambert Point (Norfolk) con el solenoide longitudinal instalado.



Figura 1.1. Fragata F101 “Álvaro de Bazán” en la estación de *deperming* de Lambert Point.

La tendencia actual en el silenciamiento magnético es utilizar los sistemas de compensación propios del buque (*degaussing*) en vez de recurrir a los procedimientos de *deperming*. No obstante esto puede llevar a la situación de que un buque pueda ser compensado con las bobinas del propio sistema de desmagnetización pero que presente alguna anomalía local que haga inevitable la aplicación de un *deperming* al conjunto. En este caso, se plantea entonces un compromiso entre la inversión en un potente sistema de desmagnetización para evitar un *deperming* o considerar que el uso del *deperming* es inevitable, y gastar menos en el sistema de desmagnetización.

Por un lado, para el trabajo con los sistemas de desmagnetización se propone buscar un método de calibración novedoso basado en Algoritmos Genéticos [3-11] que minimicen simultáneamente el nivel del campo magnético y el gradiente de la perturbación. Actualmente se utilizan procedimientos manuales muy dependientes de los expertos de las Estaciones de calibración magnética [12]. En el proceso de calibración se deben tener en cuenta factores que introducen errores como el campo magnético terrestre en la zona, el rumbo del buque, y sistema de medida, entre otros [13].

Por otro lado, en el caso de anomalías magnéticas locales que no puedan ser compensadas con el sistema de desmagnetización propio del buque y para evitar los costosos procedimientos de *deperming* se propone un método novedoso de compensación mediante bobinas dispuestas en el área de influencia o en el entorno de la fuente causante de la perturbación. De esta manera no se tienen que recurrir al uso de las estaciones de *deperming* cuyas infraestructuras son costosas, difíciles de mantener y rentabilizar para la mayoría de las marinas nacionales. Los procedimientos de cableado y desmontaje del mismo son complejos, y necesitan mucha mano de obra.

La calibración magnética de buques persigue su discreción magnética. Esto se consigue mediante un conjunto de bobinas distribuidas por el buque. Existen tres clases de bobinas, las que compensan la magnetización vertical, denominadas verticales o bobinas M , las que compensan el magnetismo longitudinal, denominadas longitudinales o bobinas L , y las que

compensan el magnetismo transversal o bobinas T [14]. Todas ellas en conjunto corresponden a una descomposición lineal del modelo de magnetizaciones del buque en función de la distribución de masas dentro de él. En este caso, el estudio que se pretende llevar a cabo utilizará la técnica de los algoritmos genéticos para minimizar, mediante un proceso iterativo de calibración [15], la perturbación existente mejorando la conseguida por métodos tradicionales. En general, se trata de reducir al mismo tiempo el nivel de la perturbación y el gradiente de la misma.

En el estudio se deberán analizar las características magnéticas del buque y el modelo magnético utilizado [4, 12, 16, 17] para establecer los parámetros a tener en cuenta en el proceso de calibración magnética. Se establecerá la formulación de las componentes magnéticas en función del rumbo del buque, la posición de los sensores, el balanceo, cabezada y otras condiciones que están presentes en la navegación [18, 19, 20]. El sistema de compensación magnética también debe ser parametrizado [15] para establecer las ecuaciones matriciales sobre las que aplicar los algoritmos de optimización [3-11].

En esta parte del trabajo se estudió el uso de los Algoritmos Genéticos (GAS) para la minimización de la perturbación magnética producida dentro del campo magnético terrestre. Se utilizarán diferentes mecanismos de selección, escalado y funciones objetivo [7], buscando no sólo valores mínimos del campo magnético sino también una reducción considerable del gradiente. Para la minimización de los valores de firma magnética se diseñó una función objetivo específica, el método de *Contención*. Este nuevo método consigue el objetivo comentado evitando la generación de rizados en torno a la solución.

En algunos casos una compensación de la perturbación magnética [21] no garantiza la ausencia de anomalías magnéticas locales, debido fundamentalmente a que la distancia se comporta con el gradiente magnético como un filtrado paso bajo, de manera que dos dipolos magnéticos separados una distancia “ d ” se presentan, aproximadamente, como un único dipolo cuando se mide la densidad de flujo magnético a una distancia mayor o igual a “ d ”. Por ello, gradientes importantes que se produzcan en una zona menor o igual a 1 metro quedarían “filtrados” a una distancia superior al metro y, teniendo en cuenta que los sensores que se utilizan para la calibración se localizan sumergidos, normalmente, a una profundidad del orden de la manga del buque, pasan desapercibidos en el procedimiento de compensación magnética. Por el mismo motivo cualquier modificación que se realice sobre esta zona no tendrá influencia alguna a la hora de la calibración. Para el primer caso, como se comentó, existen las bobinas de calibración [15] pero para el segundo no existe ningún tipo de procedimiento de compensación establecido ni sistema de medida ni elementos de compensación.

Lo habitual en plataformas navales, es este caso, es proceder a una desmagnetización de todo el conjunto mediante la utilización de bobinas instaladas ad-hoc (anexo A). Esta desmagnetización consiste en rodear a la plataforma completamente con un cable conductor por el que se hace pasar entre 500 y 1500 Amperios por metro referido esto a la separación de las espiras de corriente [2]. Este proceso de compensación magnética presenta los siguientes inconvenientes:

- Instalaciones costosas y difíciles de mantener.
- El cableado necesita entre 50 y 200 personas para su realización.

- El riesgo es elevado por la magnitud de la corriente que circula por las espiras (varios miles de amperios).

Para estos casos no existe ningún otro tipo de procedimiento que pueda resolver las posibles perturbaciones magnéticas locales (dentro del buque) excepto la modificación de la posición de los sensores de rumbo dentro o eliminación de los elementos que producen la perturbación.

En el caso de una magnetización local se propone un nuevo procedimiento consistente en la colocación de bobinas que compensen la perturbación en la zona indicada. Para ello se necesita de la elaboración de un sistema para el mapeado magnético (soporte, captación, captura y almacenamiento de señal). Una vez elaborado el sistema de medida se realizará un levantamiento sistemático de un mapa magnético de la zona objetivo para su posterior estudio y compensación mediante la técnica de algoritmos genéticos [22].

1.2 Objetivos de la Tesis

El trabajo constará de dos estudios relacionados con los apartados anteriormente comentados.

Estudio 1: Utilización de los algoritmos genéticos para la compensación de una perturbación magnética de un buque en el campo magnético terrestre. Consta de los siguientes apartados:

- Análisis de la magnetización de un buque. Se describirán las diferentes magnetizaciones del buque y su formulación, teniendo en cuenta las variables de las que depende.
- Sistemas de desmagnetización. Se estudiarán los parámetros que hacen que estos sistemas establezcan la condición de silencio magnético y se establecerán las fórmulas que gobiernan su función.
- Análisis de la compensación magnética. Se enfrentarán las ecuaciones planteadas anteriormente para establecer las bases del proceso de calibración magnética.
- Aplicación de los algoritmos genéticos a la compensación del buque. Los elementos de ajuste del sistema de *degaussing* (*SDG*) y los efectos de cada una de las bobinas serán los parámetros de configuración de los algoritmos de minimización. Un *SDG* consiste en una serie de bobinas y fuentes de corrientes distribuidas a lo largo del buque que son capaces de compensar la perturbación que produce en el campo magnético terrestre.
- Evaluación de resultados. Se compararán los resultados obtenidos con otros métodos tradicionales de cálculo.

Estudio 2: Análisis y estudio de la compensación magnética de un área local con un conjunto discreto de bobinas. Diseño de una plataforma de material no magnético para el levantamiento de un mapa de superficie de una cubierta de vuelo.

- Elaboración de un sistema individual mono-sensor. Se implementará, en primer lugar, un sistema de adquisición de un solo sensor y se evaluará sobre una plataforma ferromagnética.

- Automatización del sistema con un conjunto multi-sensor. Se diseñará una plataforma no magnética para la inclusión de varios sensores, así como el software de control automático de la captura.
- Levantamiento magnético. Se levantarán varios mapas magnéticos de buques de la misma clase para una evaluación posterior.
- Estudio de los datos y compensación. Se estudiarán los datos obtenidos y se propondrán diferentes configuraciones para compensar las anomalías detectadas.
- Evaluación de resultados. Se compararán los resultados obtenidos y se establecerán las conclusiones del estudio.

1.3 Contenido de la Tesis

A continuación se enumeran, por capítulos, los contenidos principales desarrollados en esta Tesis:

Capítulo 2: se revisarán las ecuaciones de la inducción magnética de un buque medida por una línea de sensores dependiendo del tipo de magnetización, el rumbo de las pasadas y la orientación de la línea de sensores. También se generalizarán las ecuaciones para incluir el efecto de los ángulos de cabezada, balanceo, quiniada y abatimiento, así como la orientación de los magnetómetros y la zona de calibración del buque. También se analizan varios modelos magnéticos del buque. Esto se realiza haciendo un desarrollo completo mediante ecuaciones y representaciones gráficas de la firma que mediría una línea de sensores situados en el fondo marino.

Capítulo 3: en este capítulo se establecen las ecuaciones que caracterizan un sistema de *degaussing*, el mecanismo de compensación magnética y las corrientes de equilibrio que minimizan la perturbación de campo magnético producida por el buque. También se han estudiado los efectos bobina utilizando espiras rectangulares y tramos de líneas de corriente para un caso genérico de espiras poligonales en tres dimensiones.

Capítulo 4: una vez establecidas las bases de la compensación magnética, su formulación y mecanismos de compensación, se utilizan los Algoritmos Genéticos para minimizar la firma magnética de buques. Se han utilizado diferentes mecanismos de selección, escalado y de funciones objetivo, mínimos cuadrados y *Contención*. Este último mecanismo de función objetivo denominado de *Contención* se ha desarrollado específicamente para este tipo de problemas.

Capítulo 5: para el estudio del campo magnético sobre la cubierta de vuelo de un buque se ha diseñado y construido un primer prototipo de sistema de medida mono-sensor basado en un elemento de posicionamiento regulable en altura y orientable de tres ejes. Dicho prototipo se ha utilizado para el levantamiento de un mapa magnético de la cubierta de vuelo de la primera de las plataformas navales estudiadas, plataforma *PI*. Este primer prototipo va a servir para validar el procedimiento de medida y el uso de los sensores magnéticos seleccionados para este trabajo. Los datos medidos, una vez transformados a unidades magnéticas, se muestran gráficamente y se utilizan para realizar un análisis y evaluación de los mismos. Para este estudio se han definido una serie de parámetros que nos van a cuantificar el valor de la anomalía magnética en la zona de estudio.

Capítulo 6: para el levantamiento sistemático de mapas magnéticos en cubiertas de vuelo se ha diseñado un sistema semi-automático de captura, basado en el anterior sistema mono-

sensor. En este capítulo se describen los componentes hardware y software del equipo. Una vez que se dispone de un equipo de captura multi-sensor se elaboró un nuevo procedimiento de trabajo. En este capítulo se ha elaborado el procedimiento de medida de los mapas magnéticos utilizando dicho equipo, analizando otras tres cubiertas de vuelo de buques de la misma clase para el estudio de anomalías magnéticas que puedan tener influencia sobre sensores de rumbo de los helicópteros, por si fuera una condición de la clase.

Capítulo 7: una vez obtenidos los mapas magnéticos de las cubiertas de vuelo de los buques medidos se realizó un análisis comparativo definiendo nuevos parámetros que permiten establecer de manera cuantitativa la existencia o no de anomalía magnética en la zona bajo estudio. También se han comparado estas medidas con la cubierta de vuelo de un buque de referencia dónde no existen problemas de interferencia con los sensores de rumbo de las aeronaves. De los buques analizados dos de ellos presentaban una anomalía magnética aunque eran de características diferentes. Ambos tipos de anomalía se han tratado de forma diferente y se ha establecido un método para su compensación.

Capítulo 8: este último capítulo recoge las conclusiones y líneas futuras del trabajo desarrollado. En esta Tesis se han estudiado las magnetizaciones de un buque, la forma de medirlas y de corregirlas, siempre desde el punto de vista de la minimización del campo magnético que puede medirse tanto en campo lejano como cercano. Este conocimiento de las características magnéticas del buque tiene una proyección futura muy interesante para la compensación magnética de su firma magnética sin ningún tipo de medida externa y teniendo en cuenta los valores de campo magnético medido por un número determinado de sensores dispuestos en su interior.

La Tesis además contiene una serie de apéndices donde se ha incluido información suplementaria de interés práctico. Los contenidos de los apéndices son los siguientes:

Apéndice A: breve explicación de la desmagnetización de un buque utilizando *deperming* y *wiping*.

Apéndice B: muestreo de la cubierta de vuelo de un buque para el estudio de la anomalía magnética.

Apéndice C: características técnicas de los sensores y tarjeta de adquisición de datos del sistema de captura multi-sensor.

Apéndice D: formato de los datos capturados por el sistema diseñado para el levantamiento de datos magnéticos semiautomático multi-sensor y tablas de valores de campo magnético utilizados para el estudio de la anomalía magnética una vez transformados después de ser capturados por la plataforma multi-sensor.

Apéndice E: publicaciones relacionadas con la Tesis.

1.4 Contribuciones originales de la Tesis

A continuación se enumeran, por capítulos, las contribuciones principales desarrolladas en esta tesis:

Capítulo 4: se han utilizado los algoritmos genéticos por primera vez para estudiar los diferentes mecanismos de minimización para seleccionar el que mejor se adapta a la resolución de este tipo de problemas. También se ha definido una novedosa función objetivo para este tipo de problemas de minimización que evita que se generen rizados en torno a la firma magnética que se desea minimizar y que compensa simultáneamente su valor de pico y su gradiente.

Capítulo 5: se ha diseñado y construido un novedoso prototipo para la medición del campo magnético en tres ejes con un sistema de equilibrado horizontal 2D y apuntamiento de 360°. Se ha elaborado un procedimiento nuevo de medida para el levantamiento sistemático de mapas magnéticos en superficies planas y su evaluación posterior. Como prueba del prototipo se ha medido la cubierta de vuelo de la plataforma *PI*, mostrándose gráficamente las tres componentes del mapa magnético medido y evaluando los resultados obtenidos. Para la evaluación de resultados se han definido por primera vez una serie de parámetros que permiten cuantificar las anomalías magnéticas.

Capítulo 6: una vez validado el prototipo del capítulo 6 se ha diseñado y construido un nuevo sistema de adquisición de datos multi-sensor, con medición de ángulos para el equilibrado horizontal y captura automática según la distancia de mallado seleccionada. Se ha elaborado un nuevo procedimiento de medida del sistema de adquisición de datos multi-sensor y de procesamiento de los datos.

Capítulo 7: en este capítulo se ha hecho el estudio comparativo de los diferentes mapas magnéticos utilizando los parámetros definidos en los capítulos 5 y 6. Se han establecido por primera vez los umbrales de estos parámetros que permiten clasificar las anomalías en tres niveles de severidad comparándolas con una plataforma de referencia. Como resultado de esta clasificación se ha propuesto una nueva forma de compensación de la anomalía mediante la colocación de pequeñas bobinas que actúen sobre la zona a tratar.

Capítulo 2

Magnetización de un buque y su medida

2.1 Introducción

Los buques de acero y los equipos montados en su interior son fabricados con materiales ferromagnéticos. Los materiales ferromagnéticos tienen dos características fundamentales. Por un lado, tienen una magnetización permanente, es decir, los momentos magnéticos de los átomos, debido al movimiento de los electrones, tienen tendencia a alinearse uno con otro dentro del material. Esta alineación se realiza por “dominios” dentro del material que dependen en su formación de su estructura cristalina. Por otro lado, en presencia de un campo magnético externo un material ferromagnético se magnetiza y adquieren otra magnetización inducida. Parte de esta magnetización inducida, si es muy persistente en el tiempo y va unida a factores de estrés del material, puede llegar a ser permanente.

2.2 La magnetización de un buque y la medida de la densidad de flujo magnético

El comportamiento de las magnetizaciones permanentes e inducidas de un material ferromagnético queda reflejado en la curva de histéresis. En la figura 2.1 se muestra la situación real de un material ferromagnético. Sin la aplicación de un campo magnético externo el material tiene una magnetización permanente **B_p** . El ciclo de histéresis muestra el recorrido del valor del magnetismo presente en el material cuando se le aplica un campo magnético externo.

En el caso de un buque su magnetización total va a oscilar alrededor de **B_p** (en las inmediaciones), lo que permite trabajar con la hipótesis de zona lineal donde el campo magnético inducido en el material es proporcional al campo inductor. La constante de proporcionalidad es la permeabilidad del medio.

$$\vec{B}_T = \vec{B}_P + \vec{B}_I = \vec{B}_P + \mu \cdot \vec{H} \quad (2.1)$$

Dónde,

B_T es la densidad de flujo magnético total debida a las magnetizaciones permanentes e inducidas.

B_P es la densidad de flujo magnético debida a la magnetización permanente.

B_I es la densidad de flujo magnético debida a la magnetización inducida.

Se puede decir que los buques tienen una magnetización permanente y otra inducida en presencia de un campo magnético terrestre proporcional a éste según el valor de la permeabilidad magnética del medio ($\mu > 0$) [6].

También se producen en los buques dos tipos de magnetismo, el debido a los campos dispersos producido por los equipos en funcionamiento de a bordo, y el debido a las corrientes de Foucault producido por las corrientes inducidas al moverse el buque a través de las líneas de fuerza del campo magnético terrestre. Estos campos magnéticos son difíciles de compensar y no se van a tener en cuenta en este trabajo.

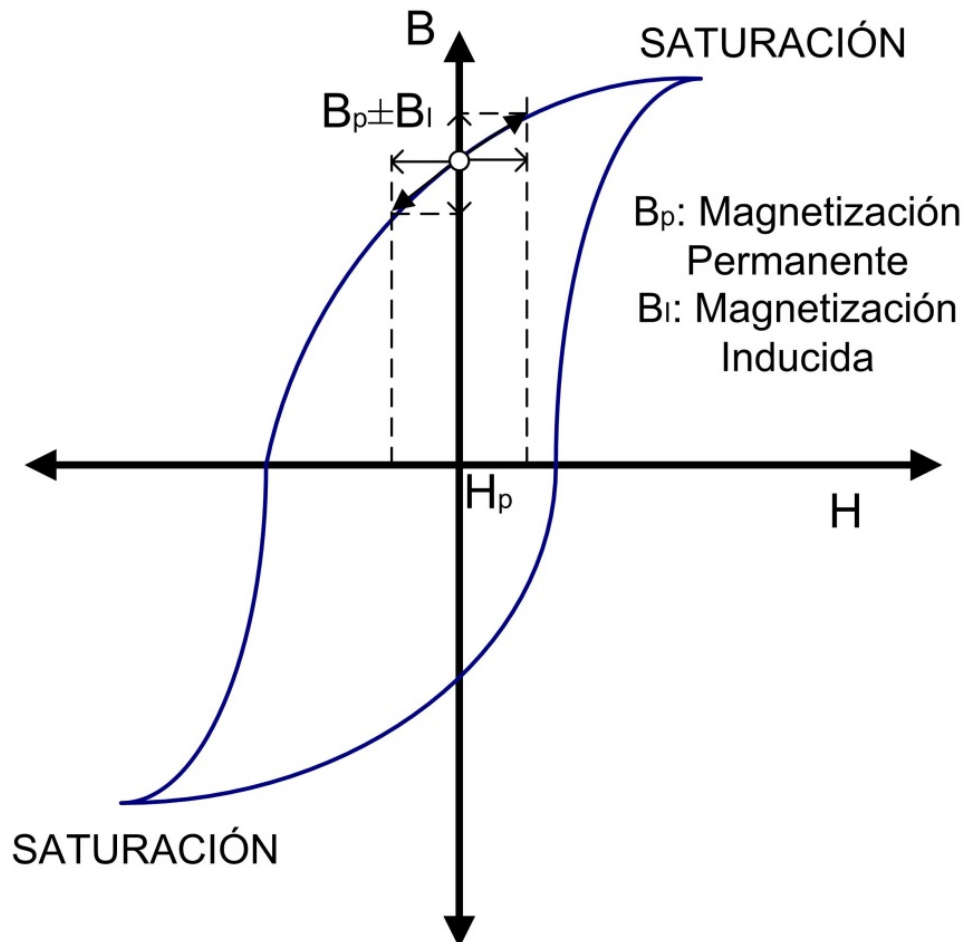


Figura 2.1. Curva de histéresis de un material ferromagnético.

En general, considerando los momentos magnéticos de los átomos podemos hablar de que cualquier material magnético está compuesto por infinitos momentos dipolares infinitesimales distribuidos por el material. Se puede hablar de una densidad de momento dipolar por unidad de volumen \vec{M} de tal manera que:

$$d\vec{m} = \vec{M} \cdot dV \quad (2.2)$$

El potencial vector magnético asociado a este momento dipolar ($d\vec{m}$) será:

$$d\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{m}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \quad (2.3)$$

Luego,

$$d\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{\vec{M}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \cdot dV' \quad (2.4)$$

El potencial vector en un punto \vec{r} del espacio producido por el material será:

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \int_{Buque} \frac{\vec{M}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \cdot dV' \quad (2.5)$$

Según lo comentado anteriormente, podemos hablar de una densidad dipolar permanente y otra inducida, por lo que (2.5) quedará de la siguiente manera:

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{Buque} \frac{\left[\vec{M}_p(\vec{r}') + \vec{M}_I(\vec{r}') \right] \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \cdot dV' \quad (2.6)$$

La inducción magnética medida en cualquier punto del espacio se podrá expresar a partir del potencial vector magnético, de la manera siguiente:

$$\vec{B}(x, y, z) = \vec{\nabla} \times \vec{A} = \vec{\nabla} \times \left\{ \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{Buque} \frac{\left[\vec{M}_p(\vec{r}') + \vec{M}_I(\vec{r}') \right] \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \cdot dV' \right\} \quad (2.7)$$

$$\vec{B}(x, y, z) = \vec{B}_p(x, y, z) + \vec{B}_I(x, y, z) \quad (2.8)$$

Esta inducción magnética se mide por una serie de sensores magnéticos o magnetómetros dispuestos a una cierta distancia del buque. En nuestro caso la disposición física de los magnetómetros será en línea y estarán sumergidos en el fondo submarino a la misma profundidad (estaciones *open range*). Sobre ellos el buque objeto de la medida realizará pasadas en direcciones perpendiculares ó “casi” perpendiculares ($\pm 14^\circ$ respecto a los 90°).

En general, tanto las magnetizaciones permanentes como las inducidas del buque se pueden descomponer respecto de un sistema de referencia interno del buque en sus respectivas componentes vertical, longitudinal y transversal. Se toman como sentidos positivos los que presentaría un buque orientado (la proa) hacia el norte Geográfico. Es decir, estas componentes tendrán la siguiente orientación (ver la figura 2.2):

- Vertical (eje Z): de arriba hacia abajo o de abajo hacia arriba. Se tomará como valor positivo del eje Z el sentido de arriba hacia abajo (ver ecuación (2.9)).
- Longitudinal (eje Y): de proa (*Pr*) a popa (*Pp*) o de popa a proa. Se tomará como valor positivo del eje Y el sentido de popa a proa (ver ecuación (2.9)).
- Transversal (eje X): de babor (*Br*) a estribor (*Er*) o de estribor a babor. Se tomará como valor positivo del eje X el sentido de estribor a babor (ver ecuación (2.9)).

El sistema de referencia de la magnetización del buque puede verse en la figura 2.2. y queda definido por la siguiente expresión:

$$\begin{cases} \text{Eje X : } \vec{ErBr} \\ \text{Eje Y : } \vec{PpPr} \\ \text{Eje Z : } \vec{ErBr} \times \vec{PpPr} \end{cases} \quad (2.9)$$

Combinando el tipo de magnetización del buque con su orientación respecto al sistema de referencia definido, podemos expresar la magnetización del buque de la siguiente manera:

$$\vec{M}(x, y, z) = \vec{M}_P(x, y, z) + \vec{M}_I(x, y, z) = (M_{PX}, M_{PY}, M_{PZ}) + (M_{IX}, M_{IY}, M_{IZ}) \quad (2.10)$$

Dónde $\vec{M}_P(x, y, z)$ es la distribución de las magnetizaciones permanentes del buque y $\vec{M}_I(x, y, z)$ la de las inducidas. Los valores M_{PX} , M_{PY} y M_{PZ} son las componentes de la magnetización permanente según los ejes X , Y y Z de referencia del buque. Lo mismo sucede con los valores M_{IX} , M_{IY} y M_{IZ} para las magnetizaciones inducidas.

La inducción magnética medida en la línea de sensores a la profundidad z_0 tendrá la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \vec{B}(x, y, z_0) &= \vec{B}_P(x, y, z_0) + \vec{B}_I(x, y, z_0) = (B_{PX}, B_{PY}, B_{PZ}) + (B_{IX}, B_{IY}, B_{IZ}) \\ &B_{SK}(M_{SX}, M_{SY}, M_{SZ}); \quad S \in \{P, I\}; \quad K \in \{X, Y, Z\}; \end{aligned} \quad (2.11)$$

Dónde cada una de las componentes B_{SK} ($S = \{P, I\}; K = \{X, Y, Z\}$), tiene contribuciones de las magnetizaciones verticales, longitudinales y transversales.

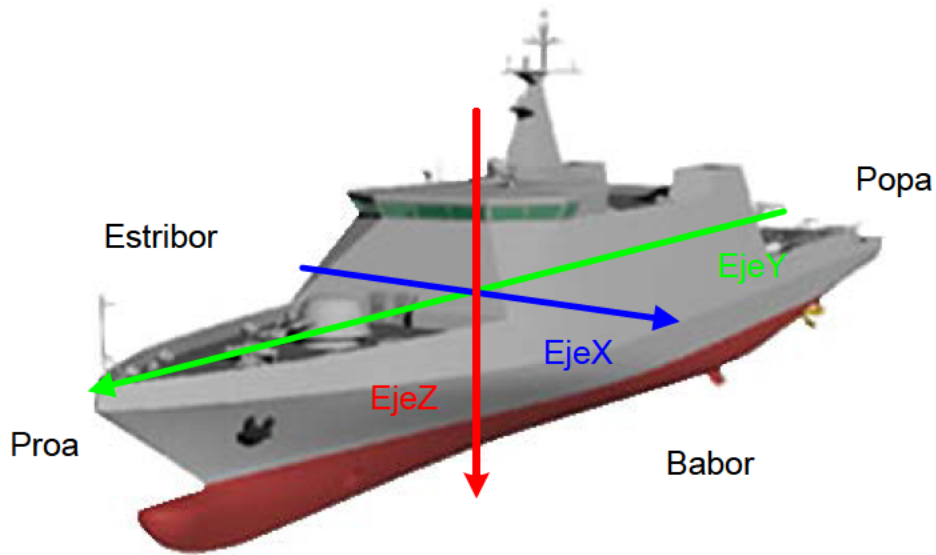


Figura 2.2. Sistema de referencia magnético de un buque.

La inducción magnética \vec{B} medida en la línea de sensores producida por las magnetizaciones del buque variará dependiendo del rumbo de éste, de la situación de la línea de magnetómetros y de las condiciones del entorno (estado meteorológico y de la mar). Por ello, cuando se hable de los diferentes B_{SK} se hará referencia a los valores máximos medidos teniendo en cuenta la orientación de los sistemas de referencia del buque, de la línea de sensores y del campo magnético terrestre. Es decir, se tendrán en cuenta las consideraciones siguientes:

- Estado de la mar “mar 0” y sin mar de fondo (EM_0).
- Velocidad del viento cero para evitar desplazamientos transversales del buque (VV_0).

- B_{PZ} será la inducción magnética medida por el eje vertical del magnetómetro producida por la magnetización permanente del buque en condiciones de EM_0 y VV_0 .
- B_{PX} será la inducción magnética medida por el eje transversal del magnetómetro (dirección de la línea de los sensores magnéticos situados en dirección Norte-Sur magnético) producida por la magnetización permanente del buque en condiciones de EM_0 y VV_0 cuando el buque se desplaza perpendicular a él.
- B_{PY} será la inducción magnética medida por el eje longitudinal del magnetómetro (dirección perpendicular a la línea de los sensores magnéticos situados en dirección Este-Oeste magnética) producida por la magnetización permanente del buque en condiciones de EM_0 y VV_0 cuando el buque se desplaza perpendicular a él.
- B_{IZ} será la inducción magnética medida por el eje vertical del magnetómetro producida por la magnetización inducida del buque en condiciones de EM_0 y VV_0 .
- B_{IX} será la inducción magnética medida por el eje transversal del magnetómetro (dirección de la línea de los sensores magnéticos situados en dirección Norte-Sur magnético) producida por la magnetización inducida del buque en condiciones de EM_0 y VV_0 cuando el buque se desplaza perpendicular a él (Este-Oeste magnético).
- B_{IY} será la inducción magnética medida por el eje longitudinal del magnetómetro (dirección perpendicular a la línea de los sensores magnéticos situados en dirección Este-Oeste magnética) producida por la magnetización inducida del buque en condiciones de EM_0 y VV_0 .

La inducción magnética del buque en un punto (x, y, z) fuera del buque $\vec{B}\{V\}$ tiene influencia de las magnetizaciones verticales, transversales y longitudinales, permanentes e inducidas del buque.

$$\vec{B}\{V\}(x, y, z) = \vec{B}\{V\}_{MP}(x, y, z) + \vec{B}\{V\}_{MI}(x, y, z) = \sum_{S=P,I} \sum_{m=x,y,z} \vec{B}\{M_{Sm}^V\}(x, y, z) \quad (2.12)$$

Dónde $\vec{B}\{V\}_{MP}(x, y, z)$ y $\vec{B}\{V\}_{MI}(x, y, z)$ son las inducciones magnéticas producida por las magnetizaciones permanentes e inducidas del buque, respectivamente, en cualquier punto (x, y, z) exterior a él. $\vec{B}\{M_{Sm}^V\}(x, y, z)$ es la inducción magnética producida por las magnetizaciones verticales ($m=z$), longitudinales ($m=y$) o transversales ($m=x$), según el valor de m , y permanentes o inducidas, según el valor de S .

Para un buque V a un rumbo h y en ciertas condiciones de cabeceo, balanceo, guiñada y abatimiento, se puede expresar la inducción magnética medida por una serie de sensores magnéticos a una profundidad determinada z_0 de la manera siguiente:

$$\begin{aligned}
 \vec{B}'\{V\}_{e(\varphi_e)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)}(x, y, z_0) &= \sum_{S=P, I} [\beta_s]_{e(\varphi_e)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)} \cdot \vec{B}\{V\}_S(x, y, z_0) = \\
 &= \sum_{S=P, I} \sum_{m=x, y, z} [\beta_{Sm}]_{e(\varphi_e)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)} \cdot \vec{B}\{M_{Sm}\}(x, y, z_0) \\
 [\beta_{Sm}]_{e(\varphi_e)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)} &\in [-1, 1]
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

Dónde φ_p es el rumbo de la pasada y φ_s es la orientación de la línea de sensores. $e(\varphi_e)$ es el error en la medida debido a los ángulos de cabeceo, balanceo, guiñada y abatimiento. $[\beta_{Sm}]_{e(\varphi_e)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)}$ son los coeficientes debidos al cambio de rumbo que se aplica a cada uno de los valores de la inducción magnética producida por cada una de las magnetizaciones permanentes e inducidas en cualquier punto del espacio exterior al buque.

Teniendo en cuenta todo esto, las ecuaciones que cumplen el valor de la inducción magnética \vec{B}' medida en una base lineal de magnetómetros situadas en el fondo marino se muestran a continuación utilizando la descomposición en inducción magnética producida por la magnetización permanente o inducida del buque; $\vec{B}' = \vec{B}'_P + \vec{B}'_I$. Este tratamiento independiente se debe a que en un caso el rumbo del buque no tiene influencia sobre el valor medido y en el otro sí. Los ángulos utilizados en las expresiones están todos referidos al Norte Geográfico.

La figura 2.3 muestra de forma esquemática la medida de la magnetización permanente de un buque durante una pasada por una base de magnetómetros dispuestos en línea. En ella se han definido dos ángulos, el ángulo que forma la línea de magnetómetros con el Norte Geográfico y el ángulo que forma la dirección y el sentido de la pasada. En este caso se puede ver que al cambiar el buque de rumbo las magnetizaciones permanentes del buque son fijas dentro de éste. Por ejemplo, si se realizan dos pasadas a rumbos opuestos una tendrá un rumbo de valor φ_p y otra un rumbo $\varphi_p + \pi$, respectivamente.

La inducción magnética \vec{B}_P producida por la magnetización permanente del buque \vec{M}_P según el gráfico de la figura 2.3 será medida por los magnetómetros de la línea de sensores, adquiriendo un valor \vec{B}'_P . La expresión matricial del valor de campo magnético medido es:

$$\begin{bmatrix} B'_{Px} \\ B'_{Py} \\ B'_{Pz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_s - \varphi_p - \frac{\pi}{2}) & \sin(\varphi_s - \varphi_p - \frac{\pi}{2}) & 0 \\ \sin(\varphi_s - \varphi_p - \frac{\pi}{2}) & \cos(\varphi_s - \varphi_p - \frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_{Px} \\ B_{Py} \\ B_{Pz} \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

También se puede expresar la ecuación (2.14) de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} B'_{Px} \\ B'_{Py} \\ B'_{Pz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\varphi_P - \varphi_S) & -\cos(\varphi_P - \varphi_S) & 0 \\ -\cos(\varphi_P - \varphi_S) & \sin(\varphi_P - \varphi_S) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_{Px} \\ B_{Py} \\ B_{Pz} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Dónde, B'_{Px} , B'_{Py} y B'_{Pz} son las componentes de la inducción magnética permanente medidas teniendo en cuenta la orientación de la línea de sensores φ_S y del rumbo de la pasada φ_P referidos éstos al norte geográfico. B_{Px} , B_{Py} y B_{Pz} son los valores máximos de las componentes de la inducción magnética permanente.

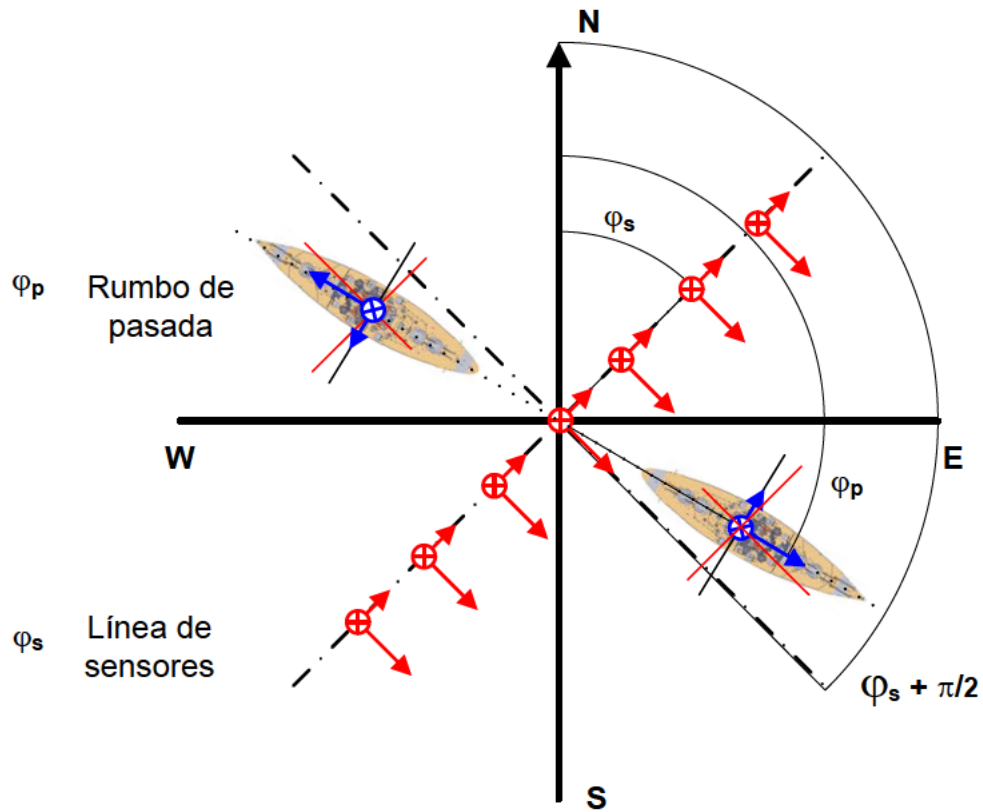


Figura 2.3 Medida de la magnetización permanente del buque.

La figura 2.4 muestra de forma esquemática la medida de la magnetización inducida de un buque durante una pasada por una base de magnetómetros dispuestos en línea. Las definiciones de ángulos son las mismas que el caso de magnetizaciones permanentes. El único cambio que se le añade es la existencia de una declinación magnética (φ_D) respecto al norte geográfico por lo que el valor de las componentes inducidas estará relacionado con el máximo inducido en la dirección norte para la componente longitudinal del campo y en la dirección este para la componente transversal. En este caso las magnetizaciones inducidas permanecen constantes referidas al sistema de referencia geográfico, es decir, no cambian a rumbos opuestos. Sin embargo, sí cambian con el rumbo respecto del sistema de referencia magnético del buque [15].

La inducción magnética \vec{B}_I producida por la magnetización inducida del buque \vec{M}_I según el gráfico de la figura 2.4 será medida por los magnetómetros de la línea de sensores, adquiriendo un valor \vec{B}'_I . La expresión matricial del valor medido es:

$$\begin{bmatrix} B'_{Ix} \\ B'_{Iy} \\ B'_{Iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_p - \varphi_D) \cdot \text{sen}(\varphi_p - \varphi_s) & -\text{sen}(\varphi_p - \varphi_D) \cdot \cos(\varphi_p - \varphi_s) & 0 \\ -\text{sen}(\varphi_p - \varphi_D) \cdot \cos(\varphi_p - \varphi_s) & \cos(\varphi_p - \varphi_D) \cdot \text{sen}(\varphi_p - \varphi_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_{Ix} \\ B_{Iy} \\ B_{Iz} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

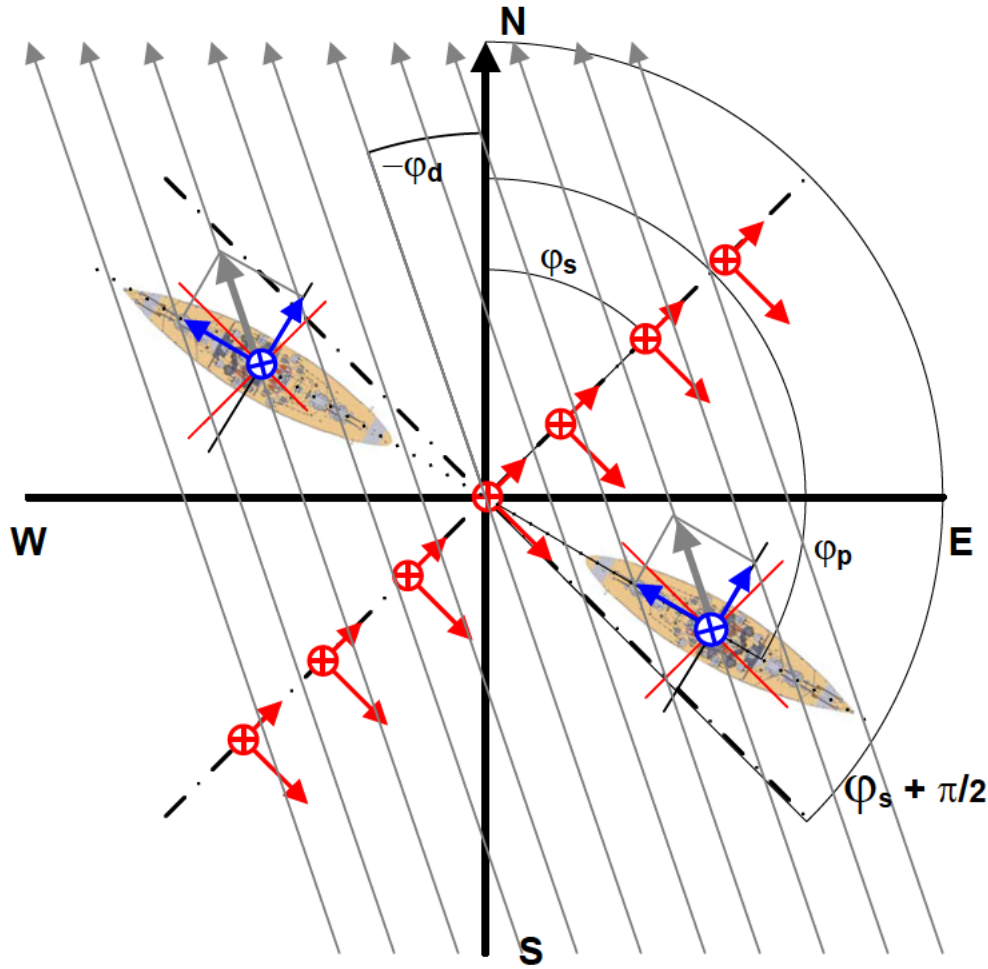


Figura 2.4 Medida de la magnetización inducida del buque.

Dónde, B'_{Ix} , B'_{Iy} y B'_{Iz} , son las componentes magnéticas inducidas medidas teniendo en cuenta las orientación de la línea de sensores φ_s , la declinación magnética φ_D y el rumbo de la pasada φ_p referidos éstos al norte geográfico. B_{Ix} , B_{Iy} y B_{Iz} , son los valores máximos de las componentes de la inducción magnética inducida al rumbo de la pasada.

Estas expresiones de la inducción magnética medida por la base de magnetómetros se pueden generalizar añadiendo los ángulos de cabeceo, balanceo, guiñada y abatimiento (ángulos de movimiento). La expresión (2.17) para la inducción magnética permanente incluye estos efectos.

$$\begin{bmatrix} B'_{Px} \\ B'_{Py} \\ B'_{Pz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\varphi_P - \varphi_S) \cdot \cos(\varphi_b) \cdot \cos(\varphi_g + \varphi_a) & -\cos(\varphi_P - \varphi_S) \cdot \text{sen}(\varphi_g + \varphi_a) & \text{sen}\varphi_b \\ -\cos(\varphi_P - \varphi_S) \cdot \text{sen}(\varphi_g + \varphi_a) & \text{sen}(\varphi_P - \varphi_S) \cdot \cos(\varphi_c) \cdot \cos(\varphi_g + \varphi_a) & \text{sen}\varphi_c \\ \text{sen}(\varphi_b) \cdot \text{sen}(\varphi_g + \varphi_a) & \text{sen}(\varphi_c) \cdot \cos(\varphi_g + \varphi_a) & \cos(\varphi_b) \cdot \cos(\varphi_c) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_{Px} \\ B_{Py} \\ B_{Pz} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\begin{bmatrix} B'_{Px} \\ B'_{Py} \\ B'_{Pz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\varphi_P - \varphi_S) \cdot \varphi_{\text{exx}} & -\cos(\varphi_P - \varphi_S) \cdot \varphi_{\text{exy}} & \varphi_{\text{exz}} \\ -\cos(\varphi_P - \varphi_S) \cdot \varphi_{\text{eyx}} & \text{sen}(\varphi_P - \varphi_S) \cdot \varphi_{\text{eyy}} & \varphi_{\text{eyz}} \\ \varphi_{\text{ezz}} & \varphi_{\text{ezy}} & \varphi_{\text{ezz}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_{Px} \\ B_{Py} \\ B_{Pz} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} B'_{Px} \\ B'_{Py} \\ B'_{Pz} \end{bmatrix} = \left(\left\{ \beta_P \right\}_{e(\varphi_e)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)} \right) \cdot \begin{bmatrix} B_{Px} \\ B_{Py} \\ B_{Pz} \end{bmatrix}$$

Dónde $\left(\left\{ \beta_P \right\}_{e(\varphi_e)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)} \right)$ es la matriz de los coeficientes trigonométricos que afectan a la medida de los sensores de la magnetización inducida del buque debido a la configuración de la base de magnetómetros, el rumbo de la pasada, y los ángulos de movimiento del buque.

En la ecuación anterior, φ_s , y φ_P , son la orientación de la línea de sensores y el rumbo de la pasada, respectivamente. φ_c , φ_b , φ_g , φ_a , son los ángulos de cabeceo, balanceo, guiñada y abatimiento. φ_{exx} , φ_{exy} , φ_{exz} , φ_{eyx} , φ_{eyy} , φ_{eyz} , φ_{ezz} , φ_{ezy} , φ_{ezz} , son los errores de la medida debidos a los ángulos mencionados.

El campo magnético inducido, como se comentó en la ecuación (2.16), incluye la declinación magnética φ_D , y se muestra en la ecuación matricial (2.18) incluyendo los ángulos de movimiento.

$$\begin{bmatrix} B'_{Ix} \\ B'_{Iy} \\ B'_{Iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen}(\varphi_P - \varphi_S) \cdot \cos(\varphi_P - \varphi_D) \cdot \varphi_{\text{exx}} & -\cos(\varphi_P - \varphi_S) \cdot \text{sen}(\varphi_P - \varphi_D) \cdot \varphi_{\text{exy}} & \varphi_{\text{exz}} \\ -\cos(\varphi_P - \varphi_S) \cdot \text{sen}(\varphi_P - \varphi_D) \cdot \varphi_{\text{eyx}} & \text{sen}(\varphi_P - \varphi_S) \cdot \cos(\varphi_P - \varphi_D) \cdot \varphi_{\text{eyy}} & \varphi_{\text{eyz}} \\ \varphi_{\text{ezz}} & \varphi_{\text{ezy}} & \varphi_{\text{ezz}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_{Ix} \\ B_{Iy} \\ B_{Iz} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\begin{bmatrix} B'_{Ix} \\ B'_{Iy} \\ B'_{Iz} \end{bmatrix} = \left[\left\{ \beta_I \right\} \right]_{e(\varphi_e)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)} \cdot \begin{bmatrix} B_{Ix} \\ B_{Iy} \\ B_{Iz} \end{bmatrix}$$

Dónde $\left[\left\{ \beta_I \right\} \right]_{e(\varphi_e)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)}$ es la matriz de los coeficientes trigonométricos que afectan a la medida de los sensores de la magnetización permanente del buque debido a la configuración de la base de magnetómetros, el rumbo de la pasada, y los ángulos de movimiento del buque.

La expresión de la inducción magnética total añadiendo los ángulos de cabeceo, balanceo, guiñada y abatimiento debida a las magnetizaciones permanentes e inducidas queda expresado de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} B'_x \\ B'_y \\ B'_z \end{bmatrix} = \left[\beta_P | \beta_I \right]_{e(\varphi_\varepsilon)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)} \cdot \begin{bmatrix} B_{Px} \\ B_{Py} \\ B_{Pz} \\ B_{Ix} \\ B_{Iy} \\ B_{Iz} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Dónde $\left[\beta_P | \beta_I \right]_{e(\varphi_\varepsilon)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)}$ es la concatenación por filas de las matrices de las dos componentes permanentes e inducidas teniendo en cuenta las condiciones de la medida.

$$[\{B'\}] = [\{\beta\}]_{e(\varphi_\varepsilon)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)} \cdot [\{B\}] \quad (2.20)$$

Dónde $[\{\beta\}]_{e(\varphi_\varepsilon)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)}$ incluye las componentes permanentes e inducidas.

La colocación de cada uno de los ejes de los sensores magnéticos sobre el fondo modificaría la ecuación (2.20) añadiendo una matriz diagonal de coeficientes que multipliquen cambiando el signo si el sentido del eje de la componente correspondiente está en sentido contrario al considerado anteriormente.

$$[\{B'\}] = [\{\beta\}]_{e(\varphi_\varepsilon)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)} \cdot \begin{bmatrix} \pm 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \pm 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pm 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pm 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pm 1 \end{bmatrix} \cdot [\{B\}] \quad (2.21)$$

Hay un factor que no se ha tenido en cuenta en todo lo desarrollado hasta el momento debido a la posición geográfica del buque. Esta situación geográfica influye en el campo magnético inducido, es decir, varía la magnetización magnética inducida. Como los barcos se calibran en una zona determinada y las compensaciones se realizan siempre relativas a aquellas zonas, la expresión (2.13) se rescribirá incorporando un factor α como se expresa a continuación:

$$\vec{B}'\{V\}_{e(\varphi_\varepsilon)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)}(x, y, z_0) = \sum_{S=P,I} \sum_{m=x,y,z} \left[\beta_{Sm} \right]_{e(\varphi_\varepsilon)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)} \Big|_{Z_0} \cdot \vec{B}\{M_{Sm}\}(x, y, z_0) \quad (2.22)$$

Dónde los coeficientes que modifican el campo magnético medido en función del rumbo de la pasada, orientación de los sensores y errores debidos a los ángulos de balance, cabezada, guiñada y desplazamiento, $[\beta_{Sm}]_{e(\varphi_\varepsilon)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)}$, quedaría modificados por unos factores α_{Sm}^{Zo} dependiendo de la relación de los valores del campo magnético terrestre en ambas zonas.

$$[\beta_{Sm}]_{e(\varphi_\varepsilon)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)} \Big|_{Z_0} = [\beta_{Sm}]_{e(\varphi_\varepsilon)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)} \cdot \alpha_{Sm}^{Zo}$$

$$\alpha_{lm}^{Zo} = \frac{B_{Tierra} \{Zona\ operación\}}{B_{Tierra} \{Zona\ calibración\}} \Big|_{lm} = \frac{B_{Tierra} \{Zo\}}{B_{Tierra} \{Zc\}} \Big|_{lm} \quad (2.23)$$

$$\alpha_{pm}^{Zo} = 1$$

Como puede observarse en la ecuación (2.23) este factor sólo afecta a las componentes inducidas ya que las permanentes no varían con la situación geográfica del buque.

La expresión matricial (2.20) una vez incluidos el factor por la situación del buque en una zona de la tierra diferente a la de calibración y la orientación de los sensores de medida, quedaría:

$$[\{B'\}] = [\{\beta\}]_{e(\varphi_\varepsilon)}^{h(\varphi_p, \varphi_s)} \Big|_{Z_0} \cdot [\{\pm 1\}] \cdot [\{B\}] \quad (2.24)$$

2.3 Modelo magnético de un buque

La modelización magnética de un buque es una tarea complicada [24] aunque en su expresión más simple se puede discretizar en una serie de dipolos distribuidos por el volumen de éste. Si la medida de la inducción magnética se realiza a una distancia suficiente estos dipolos se pueden considerar puntuales. Cuanto más cerca estemos del objeto a medir los términos de orden superior del desarrollo multipolar tendrán una contribución más importante y no se pueden despreciar. Existen diversos estudios sobre modelado del comportamiento magnético de las planchas ferromagnéticas de un buque dentro de un campo magnético [15, 16, 17] así como del conjunto completo [12], utilizando los métodos del potencial escalar y los elementos finitos. En el caso que nos ocupa se ha utilizado un modelo más sencillo basado en dipolos elementales distribuidos por el interior del barco.

Dependiendo del tipo de buque medido y de la capacidad de cálculo del sistema de medida y análisis se podrá utilizar un modelo más o menos complejo. La bondad del modelo redundará en una mejor solución a la configuración de corrientes y espiras necesaria para compensar la perturbación magnética que produce el buque en el campo magnético de la tierra.

El método más simple o modelo más sencillo está basado en la utilización de un único dipolo puntual de momento dipolar \vec{m} situado en la línea de crujía² del plano de flotación y en el punto medio entre proa y popa.

2.4 Modelo Dipolar Simple del buque

Para estudiar las influencias del comportamiento de la inducción magnética medida \vec{B} cuando el buque evoluciona perpendicularmente a la base de sensores se va a estudiar el Modelo Dipolar Simple (MDS).

Para este modelo se utilizará el desarrollo multipolar del potencial vector magnético de una espira conductora filiforme cerrada de longitud finita I' por la que circula una corriente estacionaria de intensidad I' . Ver figura 2.5.

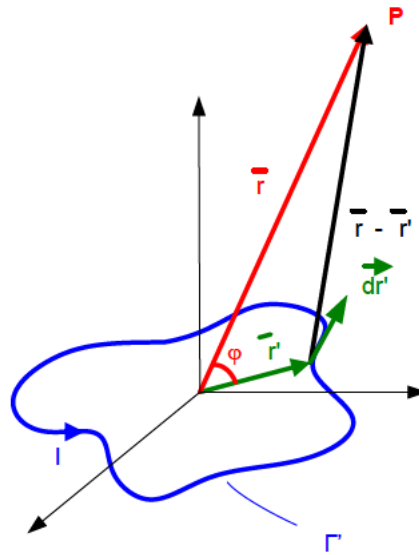


Figura 2.5. Dipolo magnético real.

El sistema de coordenadas tendrá origen en el centro geométrico de la espira, con respecto al cual los puntos de la espira tienen un vector de posición \vec{r}' . Sea P un punto del espacio de vector de posición \vec{r} relativo al sistema de coordenadas mencionado. El potencial vector magnético [23] creado por la espira conductora en el punto P viene queda expresada en la ecuación 2.25.

² Crujía es como se denomina al plano longitudinal de simetría de un buque, es decir, al espacio de proa a popa. Es una línea imaginaria que divide la cubierta en dos partes exactamente iguales, siendo paralela a la quilla.

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_o}{4\pi} \oint_{\Gamma'} \frac{I \vec{dr}'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad (2.25)$$

dónde \vec{dr}' es un vector desplazamiento infinitesimal definido en cada punto de Γ' en el sentido de la corriente. Para un punto P muy alejado de la espira conductora dónde $|\vec{r}|$

$\gg \max |\vec{r}'|$ si $|\vec{r}'| \in \Gamma'$, se puede hacer un desarrollo en serie del factor $\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$.

$$\begin{aligned} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} &= \frac{1}{\sqrt{(\vec{r} - \vec{r}')(\vec{r} - \vec{r}')}} = \frac{1}{\sqrt{|\vec{r}|^2 - 2\vec{r} \cdot \vec{r}' + |\vec{r}'|^2}} = \\ &= \frac{1}{|\vec{r}|} \left[1 + \left(-2 \frac{\vec{r} \cdot \vec{r}'}{|\vec{r}|^2} + \frac{|\vec{r}'|^2}{|\vec{r}|^2} \right) \right]^{-1/2} = \\ &= \frac{1}{|\vec{r}|} \left[1 - \frac{1}{2} \left(-2 \frac{\vec{r} \cdot \vec{r}'}{|\vec{r}|^2} + \frac{|\vec{r}'|^2}{|\vec{r}|^2} \right) + \frac{3}{8} \left(-2 \frac{\vec{r} \cdot \vec{r}'}{|\vec{r}|^2} + \frac{|\vec{r}'|^2}{|\vec{r}|^2} \right)^2 + \dots \right] \end{aligned} \quad (2.26)$$

Teniendo en cuenta que $\frac{\vec{r} \cdot \vec{r}'}{|\vec{r}|^2} \leq \frac{|\vec{r}'|}{|\vec{r}|} \ll 1$ y que $\frac{|\vec{r}'|^2}{|\vec{r}|^2} \ll \frac{|\vec{r}'|}{|\vec{r}|} \ll 1$ si $|\vec{r}'| \in \Gamma'$, la ecuación (2.26) quedaría,

$$\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \approx \frac{1}{|\vec{r}|} + \frac{\vec{r} \cdot \vec{r}'}{|\vec{r}|^3} \quad (2.27)$$

Sustituyendo (2.27) en (2.25) y despreciando los términos $\left(\frac{a}{r}\right)^3$ y superiores, nos quedaremos con el término monopolar y dipolar,

$$\vec{A}(\vec{r}) \approx \frac{\mu_o I}{4\pi |\vec{r}|} \oint_{\Gamma'} \vec{dr}' + \frac{\mu_o I'}{4\pi |\vec{r}|^3} \oint_{\Gamma'} (\vec{r} \cdot \vec{r}') \vec{dr}' \quad (2.28)$$

El primer término es el término monopolar y es nulo ya que representa la circulación a lo largo de una curva cerrada de una diferencial exacta. El segundo término es el término dipolar.

$$\oint_{\Gamma'} \vec{dr} = 0$$

$$\vec{A}(\vec{r}) \approx \frac{\mu_o I'}{4\pi |\vec{r}|^3} \oint_{\Gamma'} (\vec{r} \cdot \vec{r}') \vec{dr}' \quad (2.29)$$

Teniendo en cuenta que,

$$(\vec{r} \cdot \vec{r}') \vec{dr}' = \frac{1}{2} \left\{ (\vec{r}' \times \vec{dr}') \times \vec{r} + d[(\vec{r} \cdot \vec{r}') \vec{r}'] \right\}_{\Gamma'} \quad (2.30)$$

La ecuación (2.29) del potencial vector quedará,

$$\begin{aligned} \vec{A}(\vec{r}) &\approx \frac{\mu_o I'}{4\pi |\vec{r}|^3} \left\{ \frac{1}{2} (\oint_{\Gamma'} \vec{r}' \times \vec{dr}') \times \vec{r} + \frac{1}{2} \oint_{\Gamma'} d[(\vec{r} \cdot \vec{r}') \vec{r}'] \right\} = \\ &= \frac{\mu_o I'}{4\pi |\vec{r}|^3} \left(\frac{1}{2} \oint_{\Gamma'} \vec{r}' \times \vec{dr}' \right) \times \vec{r} \\ &\oint_{\Gamma'} d[(\vec{r} \cdot \vec{r}') \vec{r}'] = 0 \end{aligned}$$

La integral $\oint_{\Gamma'} d[(\vec{r} \cdot \vec{r}') \vec{r}']$ tiene un valor nulo porque representa la circulación a lo largo de una curva cerrada de una diferencial exacta.

Como el momento dipolar magnético se define como,

$$\vec{m} = \frac{I'}{2} \oint_{\Gamma'} \vec{r}' \times \vec{dr}' \quad (2.31)$$

El potencial vector magnético de la espira conductora por la que circula una corriente I' expresado en términos del momento dipolar quedará,

$$\vec{A}(\vec{r}) \approx \frac{\mu_o}{4\pi} \cdot \frac{\vec{m} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} \quad (2.32)$$

La inducción magnética del dipolo real situado en el origen será,

$$\vec{B}(\vec{r}) = \nabla \times \vec{A}(\vec{r}) \approx \frac{\mu_o}{4\pi} \cdot \frac{3(\vec{m} \cdot \hat{r}) \cdot \hat{r} - \vec{m}}{|\vec{r}|^3} \quad (2.33)$$

$$\hat{r} = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

dónde \hat{r} es el vector unitario de \vec{r} .

2.5. Representación matricial del MDS

En coordenadas cartesianas y en forma matricial la inducción magnética medida en cualquier punto del espacio por un dipolo puntual situado en otro punto cualquiera sería:

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \frac{\mu_0}{4\pi r^5} \cdot \begin{bmatrix} 3 \cdot (x - x_i)^2 - r^2 & 3 \cdot (x - x_i) \cdot (y - y_i) & 3 \cdot (x - x_i) \cdot (z - z_i) \\ 3 \cdot (x - x_i) \cdot (y - y_i) & 3 \cdot (y - y_i)^2 - r^2 & 3 \cdot (y - y_i) \cdot (z - z_i) \\ 3 \cdot (x - x_i) \cdot (z - z_i) & 3 \cdot (y - y_i) \cdot (z - z_i) & 3 \cdot (z - z_i)^2 - r^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Dónde,

$\vec{B} = (B_x, B_y, B_z)$; valor de la inducción magnética.

(x, y, z) ; punto dónde se desea conocer la inducción magnética.

(x_i, y_i, z_i) ; punto dónde está situado el dipolo magnético.

$\vec{P} = (m_x, m_y, m_z)$; valor de las componentes del dipolo magnético.

$r = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}$; distancia desde el punto de medida y el dipolo. (2.35)

Obteniendo cada una de las componentes,

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{3 \cdot ((x - x_i) \cdot m_x + (y - y_i) \cdot m_y + (z - z_i) \cdot m_z) \cdot (x - x_i) - m_x \cdot r^2}{\left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \right)^5} \\ B_y &= \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{3 \cdot ((x - x_i) \cdot m_x + (y - y_i) \cdot m_y + (z - z_i) \cdot m_z) \cdot (y - y_i) - m_y \cdot r^2}{\left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \right)^5} \\ B_z &= \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{3 \cdot ((x - x_i) \cdot m_x + (y - y_i) \cdot m_y + (z - z_i) \cdot m_z) \cdot (z - z_i) - m_z \cdot r^2}{\left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \right)^5} \end{aligned} \quad (2.36)$$

Un dipolo que sólo tenga un componente vertical presenta en el espacio valores en cada uno de los ejes. Lo mismo sucede con los dipolos de componente longitudinal y transversal.

Para un dipolo vertical de momento dipolar m_z la expresión (2.36) quedaría reducida a:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{3 \cdot (z - z_i) \cdot m_z \cdot (x - x_i)}{\left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \right)^5} \\ B_y &= \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{3 \cdot (z - z_i) \cdot m_z \cdot (y - y_i)}{\left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \right)^5} \\ B_z &= \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{3 \cdot (z - z_i)^2 \cdot m_z - m_z \cdot r^2}{\left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \right)^5} \end{aligned} \quad (2.37)$$

A continuación se presentan las curvas medidas por un polígono de medida de nueve magnetómetros ($M1$, $M2$, $M3$, $M4$, $M5$, $M6$, $M7$, $M8$, $M9$) de un buque modelizado por un solo dipolo de componente vertical cuando realiza una pasada en dirección perpendicular a la base de sensores (ver figura 2.6). La longitud de la pasada está normalizada a 200 puntos y es independiente de la velocidad; se han situado la proa y popa del buque en los puntos 51 y 150. Como se muestra un dipolo vertical medido por el eje vertical del magnetómetro triaxial tiene una forma simétrica respecto al punto dónde se encuentra situado el dipolo. Cuando lo mide la componente longitudinal del sensor la curva se convierte en asimétrica respecto al punto dónde se encuentra situado el dipolo y en la dirección de la pasada. La componente transversal es simétrica en la dirección de la pasada y asimétrica en la dirección transversal a la pasada. En las figuras 2.7, 2.8 y 2.9 se representan los valores de las componentes verticales (Z), transversales (X) y longitudinales (Y), respectivamente, para un dipolo vertical situado a 9 metros de la línea de sensores y con un momento dipolar m_z de 100 A.m^2 .

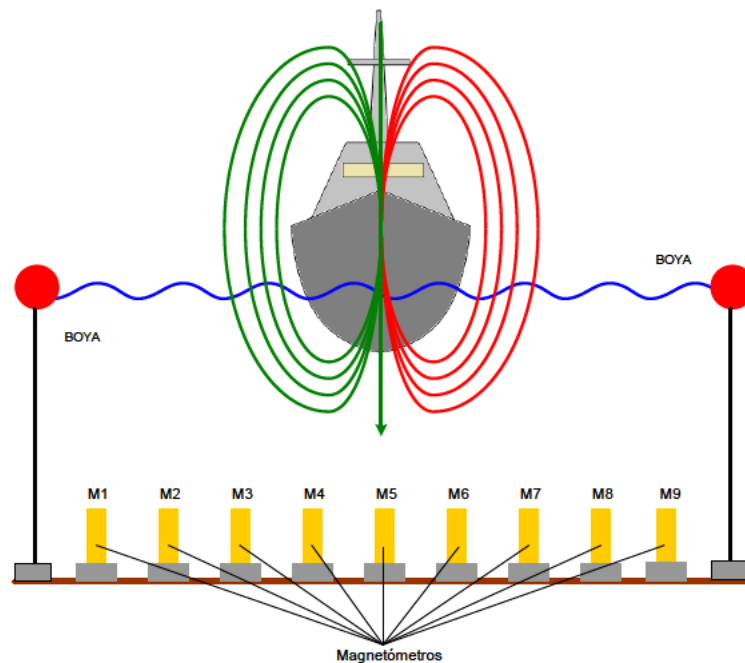


Figura 2.6. Medida del campo magnético producido por un buque modelizado por un dipolo magnético vertical.

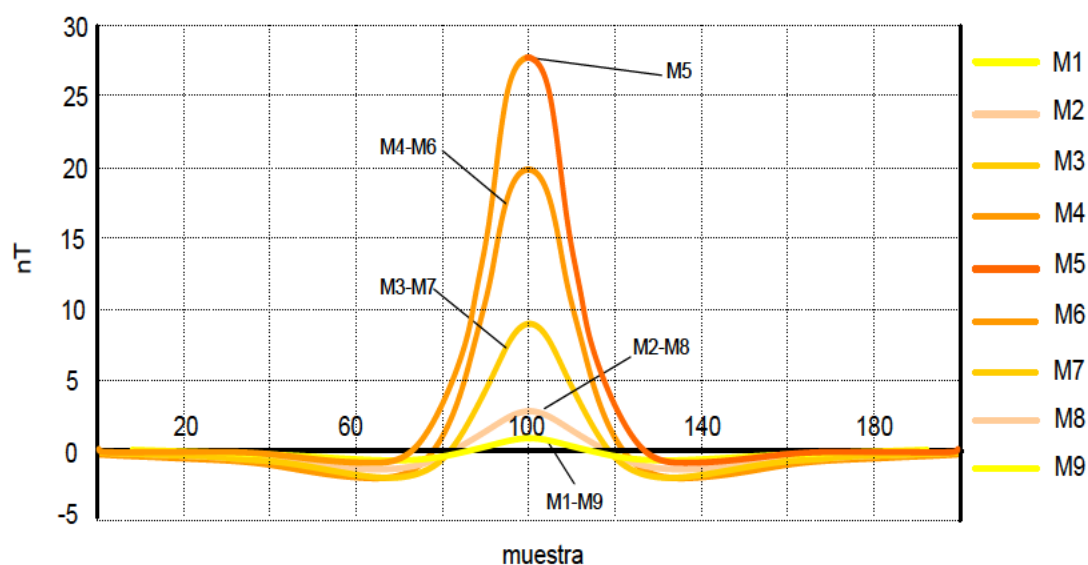


Figura 2.7. Dipolo magnético vertical ($m_z=100\text{A.m}^2$; $d=9\text{m}$) medido por una base lineal de sensores verticales.

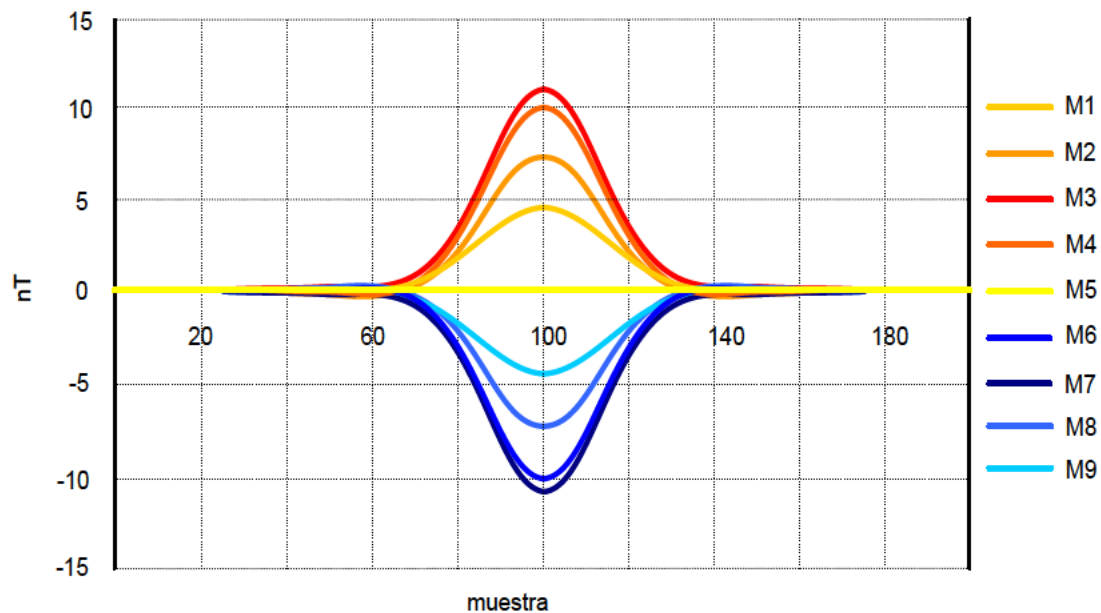


Figura 2.8. Dipolo magnético vertical ($m_z=100\text{A.m}^2$; $d=9\text{m}$) medido por una base lineal de sensores horizontales transversal.

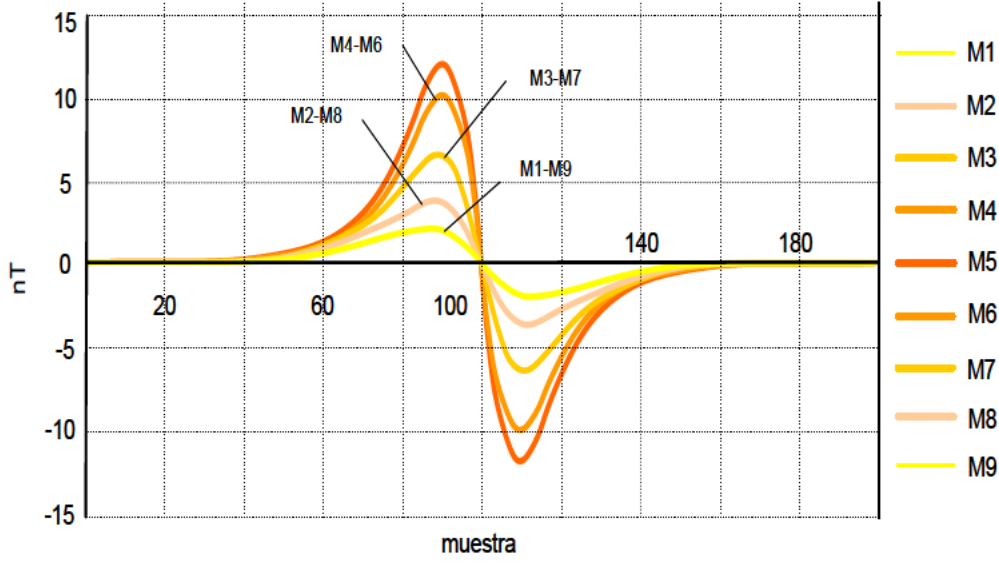


Figura 2.9. Dipolo magnético vertical ($m_z=100\text{A.m}^2$; $d=9\text{m}$) medido por una base lineal de sensores horizontales longitudinales.

Para un dipolo horizontal longitudinal de valor m_y la expresión (2.36) quedaría reducida a:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{3 \cdot (y - y_i) \cdot m_y \cdot (x - x_i)}{\left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \right)^5} \\ B_y &= \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{3 \cdot (y - y_i)^2 \cdot m_y - m_y \cdot r^2}{\left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \right)^5} \\ B_z &= \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{3 \cdot (z - z_i) \cdot m_z \cdot (y - y_i)}{\left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \right)^5} \end{aligned} \quad (2.38)$$

A continuación se presentan las curvas magnéticas de un buque modelizado por un dipolo horizontal longitudinal (figura 2.10) medidas por un polígono de medida de 9 magnetómetros y normalizada a 200 puntos. La proa corresponderá al punto 51 y la popa al punto 150.

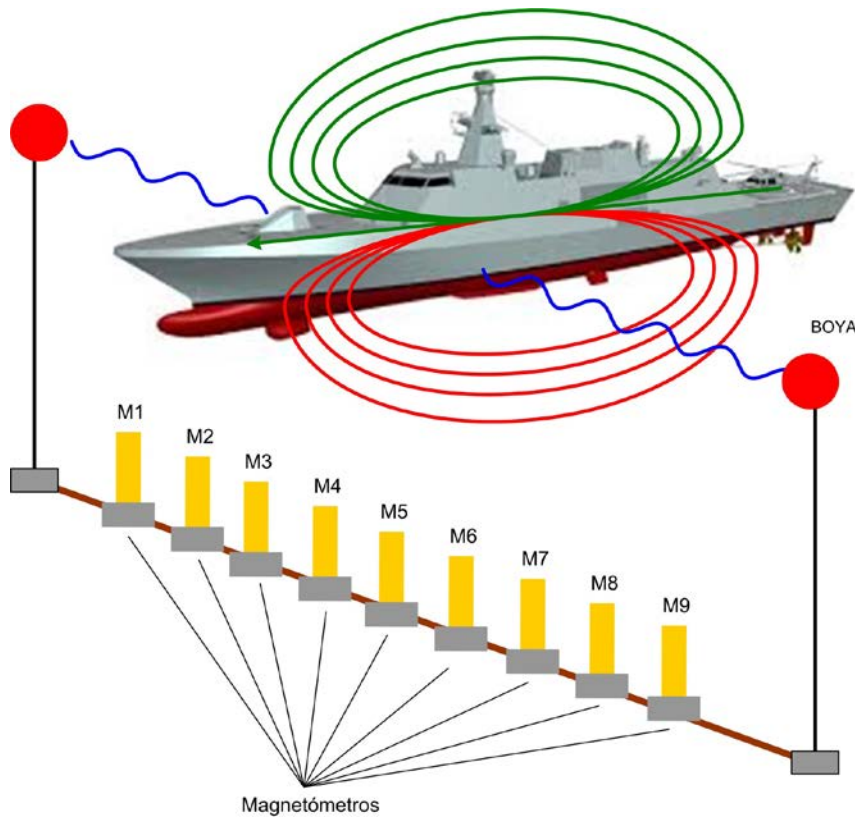


Figura 2.10. Dipolo magnético longitudinal medido por una base lineal de magnetómetros triaxiales.

Un dipolo longitudinal medido por el eje longitudinal del magnetómetro triaxial tiene una forma simétrica respecto al punto dónde se encuentra situado el dipolo. Cuando lo mide la componente vertical del sensor la curva se convierte en asimétrica respecto al punto dónde se encuentra situado el dipolo y en la dirección de la pasada. La componente transversal es asimétrica en la dirección de la pasada y también en su dirección perpendicular. En las figuras 2.11, 2.12 y 2.13 se representan los valores de las componentes verticales (Z), longitudinales (Y) y transversales (X), respectivamente, para un dipolo longitudinal situado a 9 metros de la línea de sensores y con un momento dipolar m_y de 100 A.m^2 .

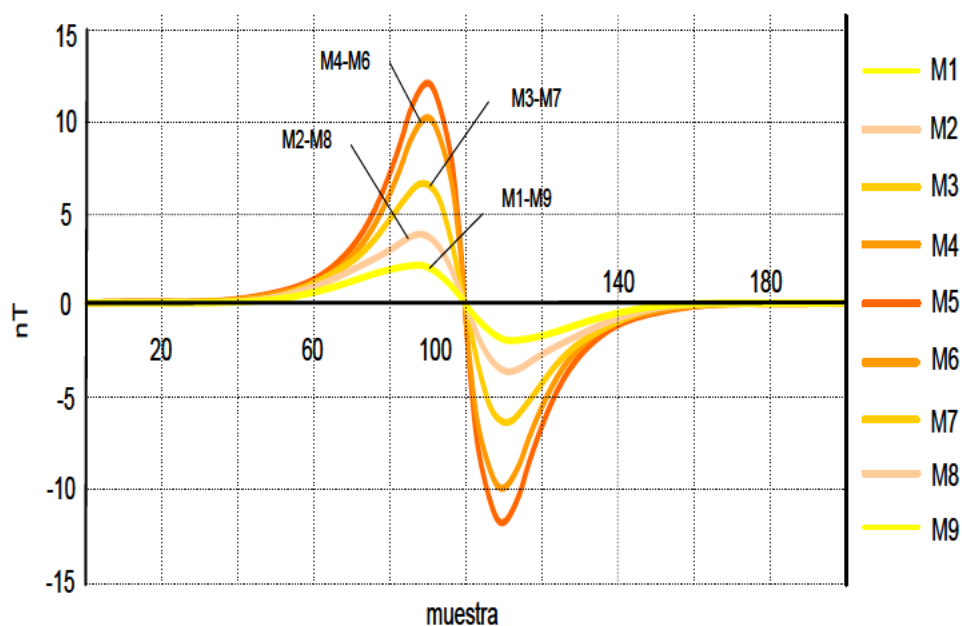


Figura 2.11. Dipolo magnético longitudinal ($m_y=100\text{A.m}^2$; $d=9\text{m}$) medido por una base lineal de sensores verticales.

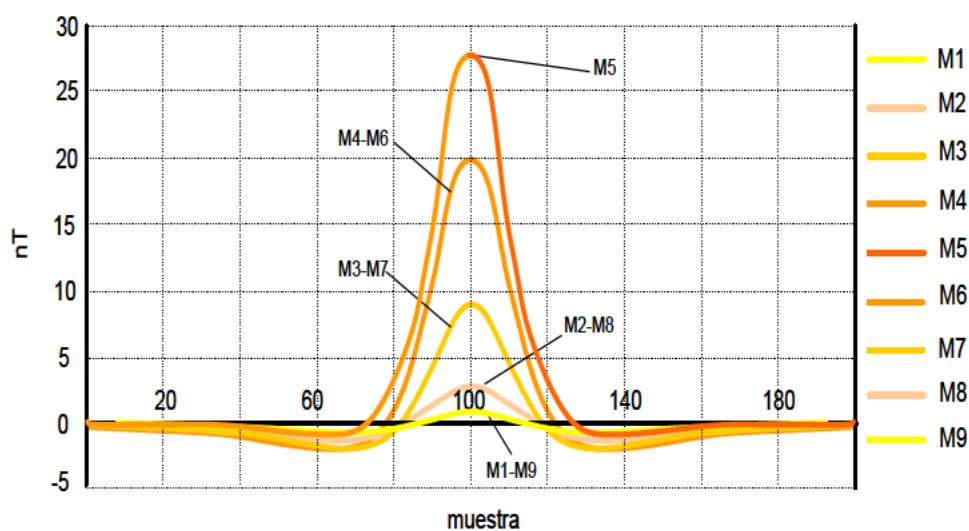


Figura 2.12. Dipolo magnético longitudinal ($m_y=100\text{A.m}^2$; $d=9\text{m}$) medido por una base lineal de sensores horizontales longitudinales.

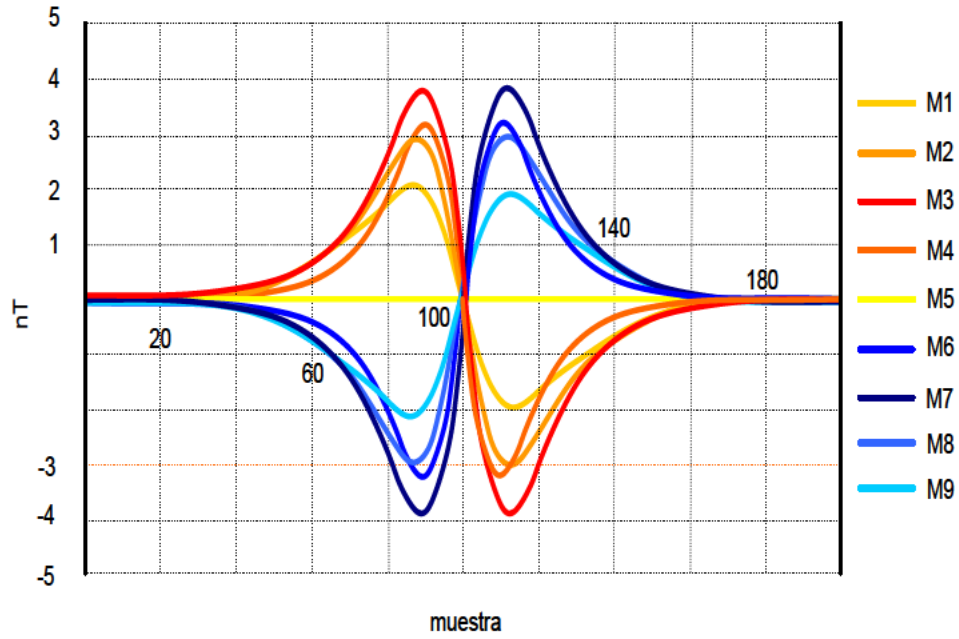


Figura 2.13. Dipolo magnético longitudinal ($m_y=100\text{A.m}^2$; $d=9\text{m}$) medido por una base lineal de sensores horizontales transversales.

Para un dipolo horizontal transversal de valor “ m_x ” la expresión (2.36) quedaría reducida a:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{3 \cdot (x - x_i)^2 \cdot m_y - m_y \cdot r^2}{\left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \right)^5} \\ B_y &= \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{3 \cdot (y - y_i) \cdot m_y \cdot (x - x_i)}{\left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \right)^5} \\ B_z &= \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{3 \cdot (z - z_i) \cdot m_z \cdot (x - x_i)}{\left(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \right)^5} \end{aligned} \quad (2.39)$$

A continuación se presentan las curvas magnéticas de un buque modelizado por un dipolo horizontal transversal (figura 2.14) medidas por un polígono de medida similar al anterior (9 magnetómetros y normalización a 200 puntos). Como se muestra un dipolo transversal medido por el eje transversal del magnetómetro triaxial tiene una forma simétrica respecto al punto dónde se encuentra situado el dipolo. Cuando lo mide la componente longitudinal del sensor la curva se convierte en asimétrica respecto al punto dónde se encuentra situado el dipolo en la dirección de la pasada y también en su dirección perpendicular. La componente vertical es simétrica en la dirección de la pasada y asimétrica en la dirección transversal a la pasada. En las figuras 2.15, 2.16 y 2.17 se representan los valores de las componentes verticales (Z), longitudinales (Y) y transversales (X), respectivamente, para un dipolo

transversal situado a 9 metros de la línea de sensores y con un momento dipolar m_x de 100 A.m².

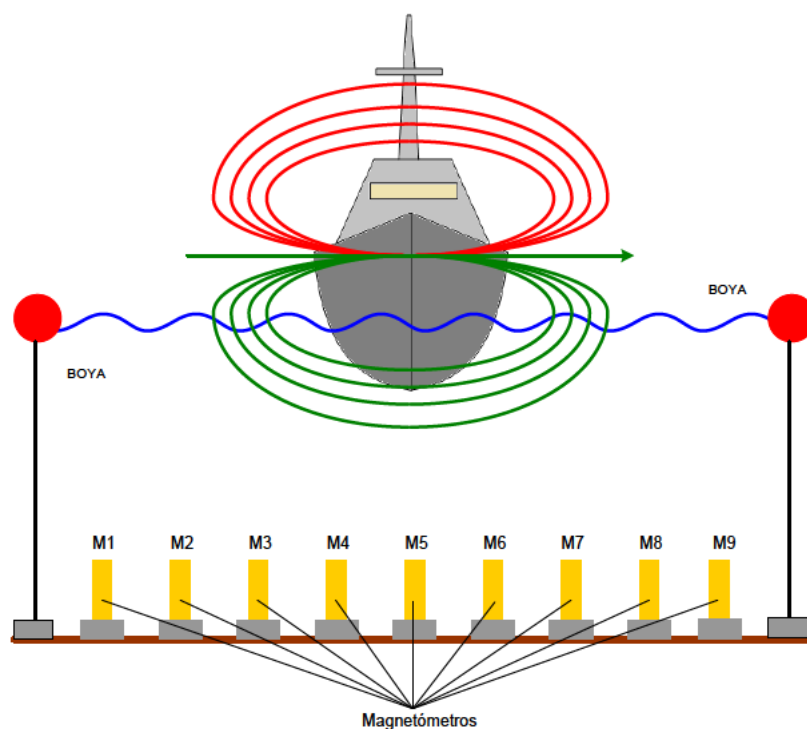


Figura 2.14. Dipolo magnético transversal medido por una base lineal de magnetómetros triaxiales.

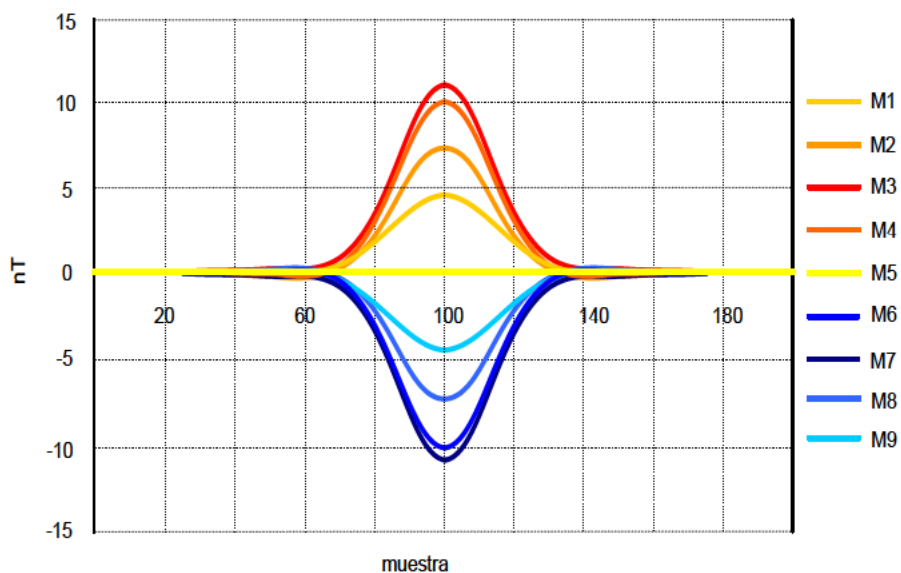


Figura 2.15. Dipolo magnético transversal ($m_x=100\text{A.m}^2$; $d=9\text{m}$) medido por una base lineal de sensores verticales.

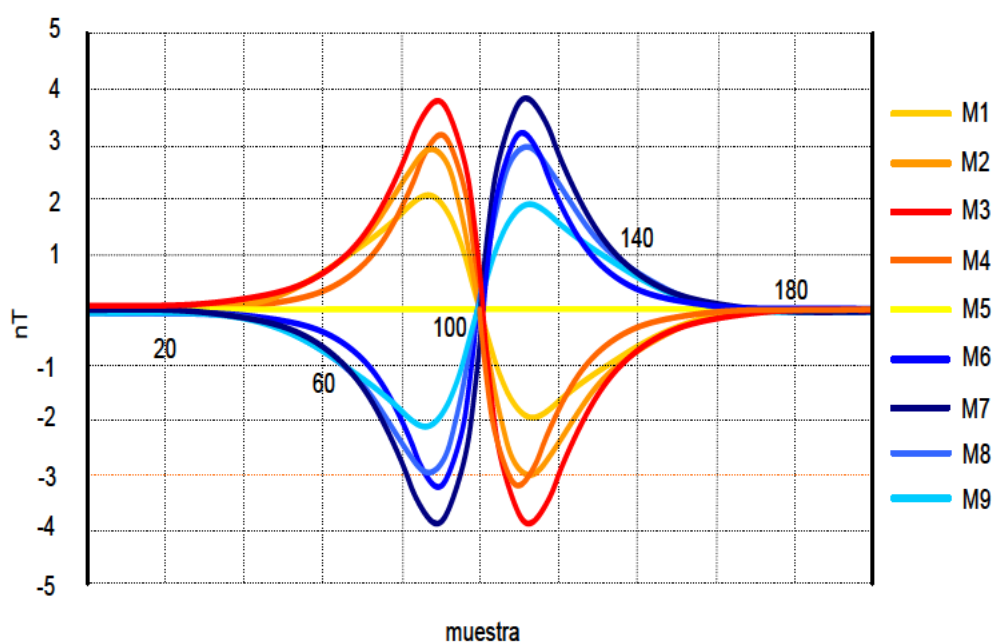


Figura 2.16. Dipolo magnético transversal ($m_x=100A.m^2$; $d=9m$) medido por una base lineal de sensores horizontales longitudinales.

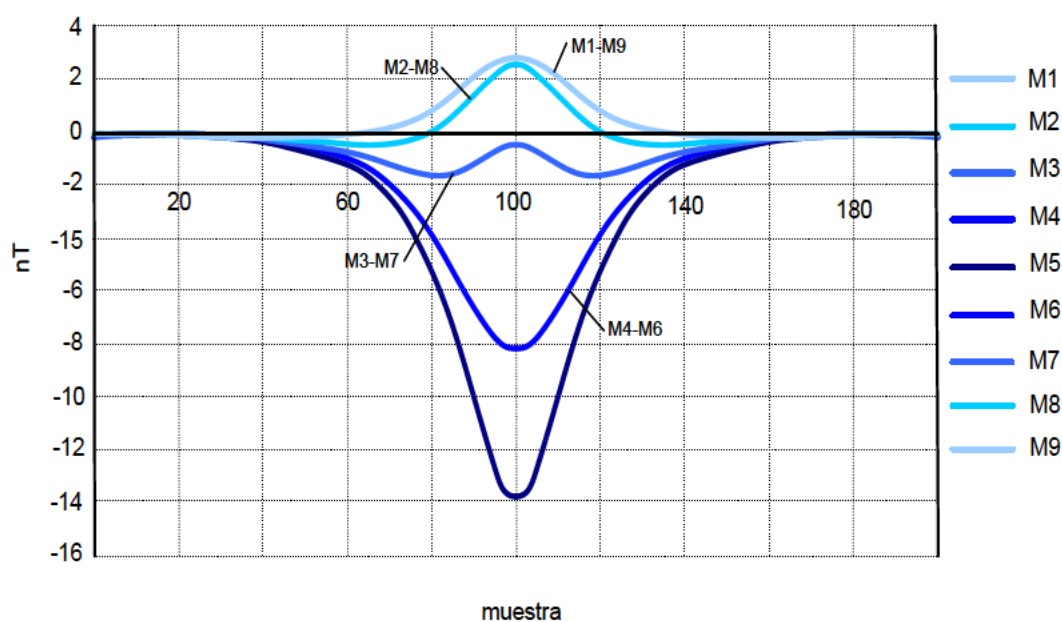


Figura 2.17. Dipolo magnético transversal ($m_x=100A.m^2$; $d=9m$) medido por una base lineal de sensores horizontales transversales.

En la figura 2.18 se puede ver una simplificación de lo visto hasta ahora del modelo *MDS* para el sensor que está situado por debajo de la quilla del buque (sensor de quilla) para el dipolo vertical y longitudinal. En el caso del dipolo transversal se utilizan todos los sensores (un corte transversal) ya que en el sensor de quilla el valor presentado es nulo. Como se puede ver haciendo uso de funciones pares, impares y dirección del corte se pueden calcular las contribuciones de cada tipo de dipolo sobre cada uno de los ejes de la base de medida.

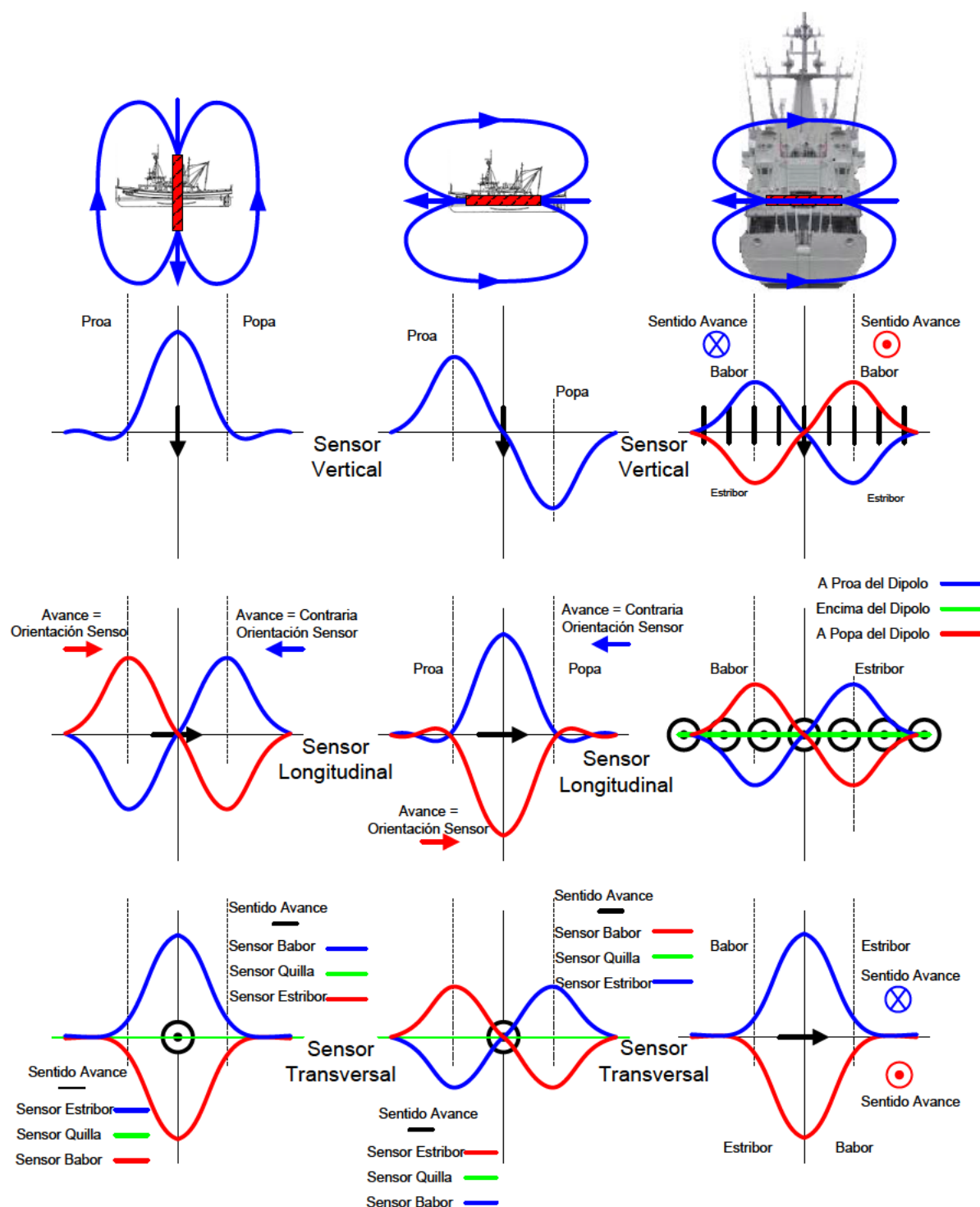


Figura 2.18. Firmas magnéticas de dipolos verticales, horizontales y transversales.

Capítulo 3

Sistema de Desmagnetización

3.1. Introducción

El sistema de desmagnetización o *degaussing* (*SDG*) de un buque consiste en una serie de bobinas distribuidas a lo largo del buque. Estas bobinas están situadas en tres planos: las bobinas tipo *V* situadas en el plano horizontal se utilizan para compensar el magnetismo vertical, Las bobinas tipo *L* están situadas en un plano vertical perpendicular a la línea de crujía y compensan el magnetismo longitudinal, la bobinas tipo *T* están situadas en un plano vertical paralelo de la línea de crujía y compensan el magnetismo transversal. Ver figura 3.1.

3.2. Caracterización de un Sistema de Desmagnetización

Para la caracterización completa de las bobinas de un *SDG* desde el punto de vista magneto-estático se necesita conocer el número de espiras *V*, *L*, *T* y la corriente que atraviesa a cada una de ellas. También cabe distinguir entre las bobinas que se utilizan para compensar las magnetizaciones permanentes y las que compensan las magnetizaciones inducidas. La diferencia fundamental entre las bobinas de permanente e inducido es que las fuentes de corriente que alimentan las de inducido varían la intensidad de corriente suministrada en función del rumbo y la localización geográfica del buque. Los sistemas modernos de desmagnetización utilizan la misma bobina para compensar el permanente y el inducido. El número de espiras es idéntico para las corrientes inducidas y permanentes. La variación de la compensación del campo inducido se realiza mediante una fuente de corriente variable. Dicha fuente superpone la corriente deseada en una condición determinada de campo magnético inducido sobre otra constante que compense el campo magnético permanente. Todo lo comentado se describe en la expresión matemática (3.1).

$$[B]_{DEG} = \sum_{K=V,L,T} \sum_{S=P,I} \{B_K\}_S \cdot n_{KS} \cdot i_{KS} \quad (3.1)$$

Donde,

$\{B_K\}_S = B\{x_c, y_c, z_c, \text{geometría}, k, s\}$, es la inducción magnética producida por una bobina centrada en (X_c, Y_c, Z_c) con una “geometría” determinada, del tipo K (V para vertical, L para longitudinal y T para transversal; ver figura 3.1) y con capacidad de corrección de campo magnético S (permanente o inducido).

En esta expresión, n_{KS} , es el número de espiras energizadas de cada bobina cuyos valores pueden variar entre $\left[-(n_{KS}^d + n_{KS}^s), n_{KS}^d + n_{KS}^s\right]$. Los superíndices d y s identifican si las espiras son las de diseño o las adicionales de respeto³, respectivamente. Para conseguir la cambiar la polaridad de cada espira, cuando sea necesario, se invierte el conexionado de los extremos de la espira o se invierten las entradas de alimentación al conjunto.

Por otro lado, i_{KS} es la corriente con la que se alimenta cada bobina y puede variar entre los valores máximos $\left[-i_{KS}^{\text{max}}, i_{KS}^{\text{max}}\right]$ que puede suministrar la fuente de corriente asociada.

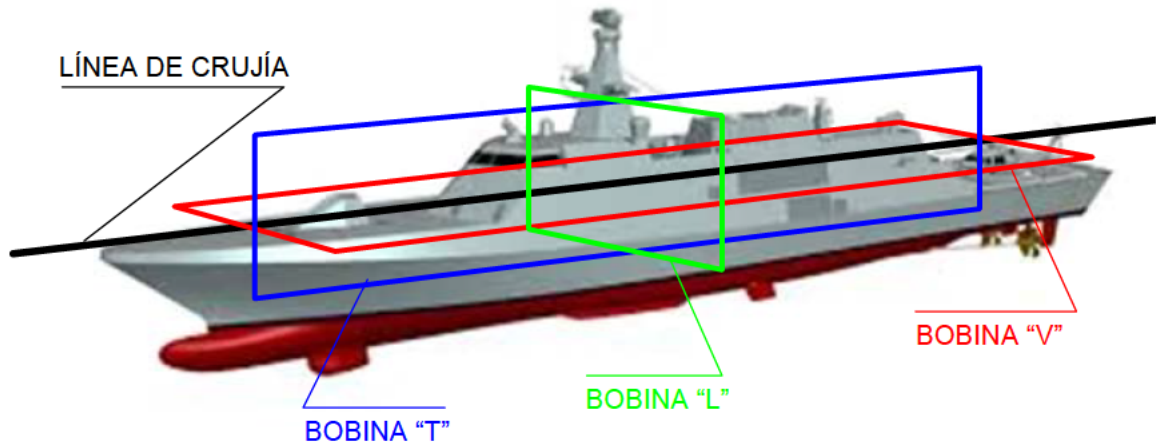


Figura 3.1. Orientación de las bobinas de *degaussing* tipo V , L y T .

Una bobina queda definida por la situación del centro geométrico, geometría, eje de compensación y tipo de magnetización objetivo (permanente o inducida). Estas características

³ Las espiras de respeto de una bobina son las que estando cableadas no están conexionadas con el resto de espiras de la bobina, es decir, las que una vez alimentada la bobina no circula corriente por ellas.

son fijas y no se pueden variar. Las características variables sobre las que se puede actuar para realizar una compensación magnética son el número de espiras n_{ks} y la corriente i_{ks} que las atraviesan. El número de espiras totales será la suma de las de diseño, es decir, las cableadas de origen en el buque n_{ks}^d , y las que se dejan sin cablear (espiras de respeto n_{ks}^s). Al poder conexionar las espiras en sentido inverso se puede considerar que el número total de éstas oscila entre $\pm n_{ks}^{max}$. El valor de la corriente también puede tomar valores positivos y negativos del máximo de su valor, $\pm i_{ks}^{max}$.

La inducción magnética producida por la bobina **KS** con n espiras y corriente i es la siguiente:

$$\vec{B}\{B_K\}_S(x, y, z) \cdot n_{KS} \cdot i_{KS} \quad (3.2)$$

Con el sistema de *degaussing* activado, la inducción magnética producida por éste en la zona de operación **Zo** a un rumbo h de pasada determinado es:

$$\begin{aligned} \vec{B}[B]_{DEG}^h &= \sum_{K=V,L,T} \sum_{S=P,I} \vec{B}\{B_K\}_S(x, y, z) \cdot n_{KS} \cdot i_{KS} \cdot \lambda_{KS}^h \Big|_{Zo} \\ \lambda_{KS}^h \Big|_{Zo} &= \alpha_{KS}^{Zo} \cdot \alpha_{KS}^h \\ \alpha_{KS}^{Zo} &= \frac{B\{Zona\ operación\}}{B\{Zona\ calibración\}} \Big|_{KS} = \frac{B\{Zo\}}{B\{Zc\}} \Big|_{KS} \\ \alpha_{KS}^h &\in [-1,1]; \alpha_{KP}^h = 1 \\ \alpha_{KP}^{Zo} &= 1, \text{ si } Z_o = Z_c \\ Z_o &= \text{Zona de operación.} \\ Z_c &= \text{Zona de calibración.} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Los λ_{KS}^h son coeficientes debidos a la situación geográfica y al rumbo del buque que hacen que las corrientes aplicadas difieran de los valores en la zona de calibración similares a los que se aplican en la ecuación (2.23). Estos coeficientes variables actúan sobre la corriente que atraviesan a las bobinas de inducido. En la expresión matricial (3.4) se ha generalizado la expresión (3.3) para permanente e inducido.

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix}_{DEG}^{(h)} = \begin{bmatrix} B_x\{B_V\}_P \cdot \lambda_{VPX} & B_x\{B_V\}_I \cdot \lambda_{VIX} & B_x\{B_L\}_P \cdot \lambda_{LPX} & B_x\{B_L\}_I \cdot \lambda_{LIX} & B_x\{B_T\}_P \cdot \lambda_{TPX} & B_x\{B_T\}_I \cdot \lambda_{TIX} \\ B_y\{B_V\}_P \cdot \lambda_{VPY} & B_y\{B_V\}_I \cdot \lambda_{VIY} & B_y\{B_L\}_P \cdot \lambda_{LPY} & B_y\{B_L\}_I \cdot \lambda_{LIY} & B_y\{B_T\}_P \cdot \lambda_{TPY} & B_y\{B_T\}_I \cdot \lambda_{TIY} \\ B_z\{B_V\}_P \cdot \lambda_{VPZ} & B_z\{B_V\}_I \cdot \lambda_{VIZ} & B_z\{B_L\}_P \cdot \lambda_{LPZ} & B_z\{B_L\}_I \cdot \lambda_{LIZ} & B_z\{B_T\}_P \cdot \lambda_{TPZ} & B_z\{B_T\}_I \cdot \lambda_{TIZ} \end{bmatrix}^{(h)} \cdot \begin{bmatrix} n_{VP} \cdot i_{VP} \\ n_{VI} \cdot i_{VI} \\ n_{LP} \cdot i_{LP} \\ n_{LI} \cdot i_{LI} \\ n_{TP} \cdot i_{TP} \\ n_{TI} \cdot i_{TI} \end{bmatrix}^{(h)} \quad (3.4)$$

Es importante establecer los sentidos positivos del sistema de *degaussing* de un buque. Como la función de un *SDG* es compensar el campo magnético de la tierra, se tomará como sentido positivo del campo magnético producido por aquél que compensa la perturbación magnética cuando dicho buque se encuentra situado a rumbo norte dentro del hemisferio norte geográfico. Por ello los sentidos de las diferentes bobinas del *SDG* quedarán de la siguiente manera:

- Bobinas tipo *V* o vertical: el campo producido cuando la corriente que circula por el *SDG* es positiva debe estar dirigido hacia arriba, es decir, el campo magnético positivo es hacia arriba.
- Bobinas tipo *L* o longitudinal: el campo producido cuando la corriente que circula por el *SDG* es positiva debe estar dirigido hacia popa, es decir, el campo magnético positivo lleva el sentido de proa a popa.
- Bobinas tipo *T* o transversal: el campo producido cuando la corriente que circula por el *SDG* es positiva debe estar dirigido hacia estribor, es decir, el campo magnético positivo tienen el sentido de babor hacia estribor.

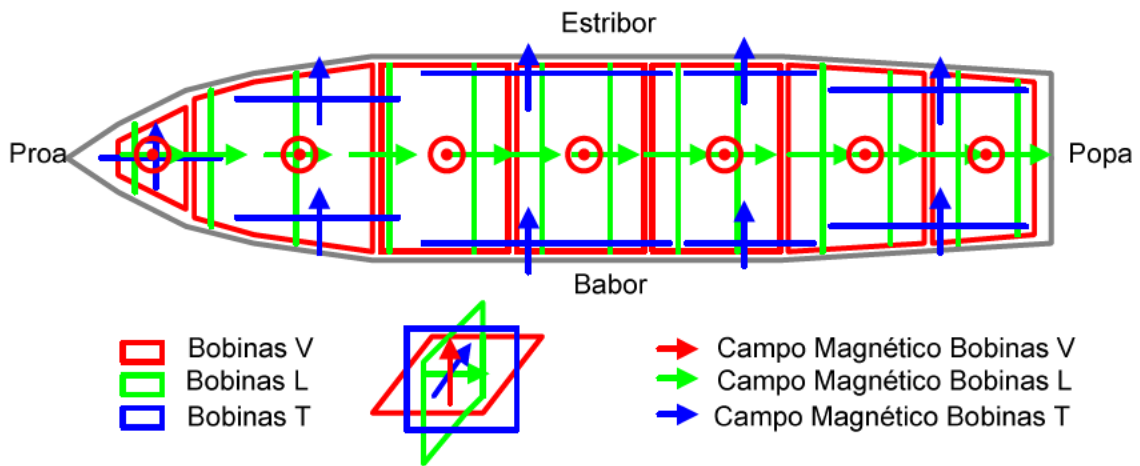


Figura 3.2. Sentido positivo del campo magnético producido por las bobinas de un *SDG*.

En la figura 3.2 se muestran los sentidos positivos de las bobinas de un *SDG* instaladas en un buque vistos desde arriba. Las bobinas verticales están representadas por el color rojo y están situadas en un plano horizontal. Las bobinas que compensan el campo magnético longitudinal son de color verde y están situadas en un plano vertical. Las bobinas de color azul compensan el campo magnético transversal y también están situadas en un plano vertical.

3.3. Efectos Bobina

Los efectos bobina son las contribuciones de las diferentes bobinas del *SDG* del buque a la compensación de la perturbación del campo magnético de la tierra. Las bobinas suelen ser planas de geometría normalmente rectangular, aunque en zonas de proa y popa pueden tener geometría trapezoidal (ver figura 3.2). La mejor manera de calcular los efectos es de forma empírica activando y desactivando cada una de ellas independientemente para medir la inducción magnética por los sensores de la base. De esta manera tendremos el efecto producido por todas las bobinas a la profundidad de medida. En este trabajo se utilizarán los efectos producidos por espiras rectangulares a una profundidad p de la superficie del mar.

A continuación se realizará el estudio de una espira rectangular en el plano *XY* (figura 3.3) y se generalizará para bobinas situadas en los otros dos planos.

En buques de fibra o madera el valor máximo de los efectos de cada bobina del *SDG* son muy aproximadamente iguales a los teóricos calculados por un conjunto de espiras o hilos de corriente finitos. En buques de hierro no ocurre lo mismo ya que la cantidad de material ferromagnético del casco produce un “apantallamiento” ligero en el campo magnético de cada una de las bobinas. En la práctica, a la hora de la calibración, se consigue mayor exactitud midiendo el efecto que produce cada una de las bobinas. Sin embargo, durante el diseño de un sistema de *degaussing* para un buque se deben utilizar modelos matemáticos que estimen de la mejor manera posible la inducción magnética producida a la distancia de la medida [2, 4].

3.3.1 Espira Plana XY

Se considera una espira plana rectangular de dimensión $2a \times 2b$ situada en el plano XY centrada en el origen y a una distancia h de éste. Se mide la señal captada por los sensores magnéticos situados en las posiciones x_i a una profundidad p cuando el buque evoluciona en la dirección del eje Y . En la figura 3.3 se muestra un esquema de esta configuración. La espira es

El estudio se realizará teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se divide la espira en tramos rectos dl_1 , dl_2 , dl_3 y dl_4 .
- Se calcula la inducción magnética en ejes $X=x_i=constante$ haciendo uso de la Ley de *Biot-Savart* (ecuación (3.5)) [23].
- $x_i \in \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9\}$, según se muestra en la figura 3.3.

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot I \cdot \frac{\vec{dl} \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} \quad (3.5)$$

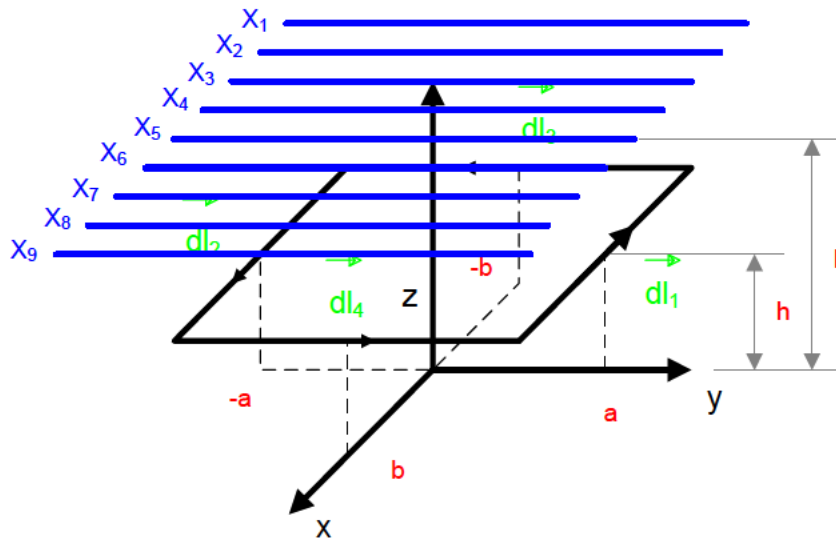


Figura 3.3. Espira plana XY.

El hilo de corriente correspondiente a $y = a$ contribuirá de la siguiente manera a la inducción magnética medida por los magnetómetros situados en x_i :

$$\begin{aligned}
 \vec{dl}_1' &= (-dx', 0, 0); \text{ vector diferencial de corriente.} \\
 \vec{r}' &= (x', a, h); \text{ vector posición del diferencial de corriente.} \\
 \vec{r} &= (x_i, y, p); \text{ vector posición del punto dónde se calcula } \vec{B}. \\
 (\vec{r} - \vec{r}') &= (x_i - x', y - a, p - h). \\
 \vec{dl}_1' \times (\vec{r} - \vec{r}') &= \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ -dx' & 0 & 0 \\ x_i - x' & y - a & p - h \end{vmatrix} = dx' \cdot (p - h) \cdot \hat{j} + (a - y) \cdot dx' \cdot \hat{k}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Para el hilo de corriente correspondiente a $y = -a$ la inducción magnética medida por los magnetómetros situados en x_i será:

$$\begin{aligned}
 \vec{dl}_2' &= (dx', 0, 0); \text{ vector diferencial de corriente.} \\
 \vec{r}' &= (x', -a, h); \text{ vector posición del diferencial de corriente.} \\
 \vec{r} &= (x_i, y, p); \text{ vector posición del punto dónde se calcula } \vec{B}. \\
 (\vec{r} - \vec{r}') &= (x_i - x', y + a, p - h). \\
 \vec{dl}_2' \times (\vec{r} - \vec{r}') &= \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ dx' & 0 & 0 \\ x_i - x' & y + a & p - h \end{vmatrix} = dx' \cdot (h - p) \cdot \hat{j} + (y + a) \cdot dx' \cdot \hat{k}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

El hilo de corriente correspondiente a $x = -b$ contribuirá de la siguiente manera a la inducción magnética medida por los magnetómetros a lo largo de x_i :

$$\begin{aligned}
 \vec{dl}_3' &= (0, -dy', 0); \text{ vector diferencial de corriente.} \\
 \vec{r}' &= (-b, y', h); \text{ vector posición del diferencial de corriente.} \\
 \vec{r} &= (x_i, y, p); \text{ vector posición del punto dónde se calcula } \vec{B}. \\
 (\vec{r} - \vec{r}') &= (x_i + b, y - y', p - h). \\
 \vec{dl}_3' \times (\vec{r} - \vec{r}') &= \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & -dy' & 0 \\ x_i + b & y - y' & p - h \end{vmatrix} = dy' \cdot (h - p) \cdot \hat{i} + (x_i + b) \cdot dy' \cdot \hat{k}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Por último, el hilo de corriente correspondiente a $\mathbf{x} = \mathbf{b}$ contribuirá de la siguiente manera a la inducción magnética medida por los magnetómetros a lo largo de \mathbf{x}_i :

$$\begin{aligned}
 \vec{dl}'_3 &= (0, dy', 0); \text{ vector diferencial de corriente.} \\
 \vec{r}' &= (b, y', h); \text{ vector posición del diferencial de corriente.} \\
 \vec{r} &= (x_i, y, p); \text{ vector posición del punto dónde se calcula } \vec{B}. \\
 (\vec{r} - \vec{r}') &= (x_i - b, y - y', p - h). \\
 \vec{dl}'_3 \times (\vec{r} - \vec{r}') &= \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ 0 & dy' & 0 \\ x_i - b & y - y' & p - h \end{vmatrix} = dy' \cdot (p - h) \cdot \hat{i} + (x_i - b) \cdot dy' \cdot \hat{k}
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Aplicando el principio de superposición, la inducción magnética correspondiente a la contribución de cada uno de los tramos de la espira considerada será:

$$\begin{aligned}
 \vec{dB}_{Espira} &= \vec{dB}_1 + \vec{dB}_2 + \vec{dB}_3 + \vec{dB}_4; \\
 \oint_{Espira} \vec{dB}_{Espira} &= \int_{-b}^b \vec{dB}_1 + \int_{-b}^b \vec{dB}_2 + \int_{-a}^a \vec{dB}_3 + \int_{-a}^a \vec{dB}_4 = \\
 &= \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \left[\int_{-b}^b \frac{dx' \cdot (p - h) \cdot \hat{j} + (a - y) \cdot dx' \cdot \hat{k}}{[(x_i - x')^2 + (y - a)^2 + (p - h)^2]^{3/2}} + \int_{-b}^b \frac{dx' \cdot (h - p) \cdot \hat{j} + (y + a) \cdot dx' \cdot \hat{k}}{[(x_i - x')^2 + (y + a)^2 + (p - h)^2]^{3/2}} + \right. \\
 &\quad \left. + \int_{-a}^a \frac{dy' \cdot (h - p) \cdot \hat{i} + (x_i + b) \cdot dy' \cdot \hat{k}}{[(x_i + b)^2 + (y - y')^2 + (p - h)^2]^{3/2}} + \int_{-a}^a \frac{dy' \cdot (p - h) \cdot \hat{i} + (x_i - b) \cdot dy' \cdot \hat{k}}{[(x_i - b)^2 + (y - y')^2 + (p - h)^2]^{3/2}} \right]
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Las componentes de la inducción magnética serán:

$$B_x = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \left[\int_{-a}^a \frac{(h - p)}{[(x_i + b)^2 + (y - y')^2 + (p - h)^2]^{3/2}} \cdot dy' + \int_{-a}^a \frac{(p - h)}{[(x_i - b)^2 + (y - y')^2 + (p - h)^2]^{3/2}} \cdot dy' \right] \tag{3.11.a}$$

$$B_y = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \left[\int_{-b}^b \frac{(p - h)}{[(x_i - x')^2 + (y - a)^2 + (p - h)^2]^{3/2}} \cdot dx' + \int_{-b}^b \frac{(h - p)}{[(x_i - x')^2 + (y + a)^2 + (p - h)^2]^{3/2}} \cdot dx' \right] \tag{3.11.b}$$

$$\begin{aligned}
 B_z &= \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \left[\int_{-b}^b \frac{(a - y)}{[(x_i - x')^2 + (y - a)^2 + (p - h)^2]^{3/2}} \cdot dx' + \int_{-b}^b \frac{(y + a)}{[(x_i - x')^2 + (y + a)^2 + (p - h)^2]^{3/2}} \cdot dx' + \right. \\
 &\quad \left. + \int_{-a}^a \frac{(m_x + b)}{[(x_i + b)^2 + (y - y')^2 + (p - h)^2]^{3/2}} \cdot dy' + \int_{-a}^a \frac{(m_x - b)}{[(x_i - b)^2 + (y - y')^2 + (p - h)^2]^{3/2}} \cdot dy' \right]
 \end{aligned} \tag{3.11.c}$$

Por la simplificación del problema estas integrales tienen solución analítica y su resultado se expresa a continuación:

$$B_x = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \left[-\frac{d \cdot \left[(y+a) \cdot \sqrt{(y-a)^2 + (b+x_i)^2 + (p-h)^2} + (a-y) \cdot \sqrt{(y+a)^2 + (b+x_i)^2 + (p-h)^2} \right]}{\left[(x_i+b)^2 + (y+a)^2 + (p-h)^2 \right]^{1/2} \cdot \left[(x_i+b)^2 + (y-a)^2 + (p-h)^2 \right]^{1/2} \cdot ((b+x_i)^2 + d^2)} + \right. \\ \left. + \frac{d \cdot \left[(y+a) \cdot \sqrt{(y-a)^2 + (b-x_i)^2 + (p-h)^2} + (a-y) \cdot \sqrt{(y+a)^2 + (b+x_i)^2 + (p-h)^2} \right]}{\left[(-x_i+b)^2 + (y+a)^2 + (p-h)^2 \right]^{1/2} \cdot \left[(-x_i+b)^2 + (y-a)^2 + (p-h)^2 \right]^{1/2} \cdot ((b-x_i)^2 + d^2)} \right] \quad (3.12)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{d \cdot \left[(b+x_i) \cdot \sqrt{(y-a)^2 + (b-x_i)^2 + (p-h)^2} + (b-x_i) \cdot \sqrt{(y-a)^2 + (b+x_i)^2 + (p-h)^2} \right]}{\left[(x_i+b)^2 + (y-a)^2 + (p-h)^2 \right]^{1/2} \cdot \left[(-x_i+b)^2 + (y-a)^2 + (p-h)^2 \right]^{1/2} \cdot ((y-a)^2 + d^2)} - \right. \\ \left. - \frac{d \cdot \left[(b+x_i) \cdot \sqrt{(y+a)^2 + (b-x_i)^2 + (p-h)^2} + (b-x_i) \cdot \sqrt{(y+a)^2 + (b+x_i)^2 + (p-h)^2} \right]}{\left[(x_i+b)^2 + (y+a)^2 + (p-h)^2 \right]^{1/2} \cdot \left[(-x_i+b)^2 + (y+a)^2 + (p-h)^2 \right]^{1/2} \cdot ((y+a)^2 + d^2)} \right] \quad (3.13)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{(a-y) \cdot \left[(b+x_i) \cdot \sqrt{(y-a)^2 + (b-x_i)^2 + (p-h)^2} + (b-x_i) \cdot \sqrt{(y-a)^2 + (b+x_i)^2 + (p-h)^2} \right]}{\left[(x_i+b)^2 + (y-a)^2 + (p-h)^2 \right]^{1/2} \cdot \left[(-x_i+b)^2 + (y-a)^2 + (p-h)^2 \right]^{1/2} \cdot ((y-a)^2 + d^2)} + \right. \\ \left. + \frac{(a+y) \cdot \left[(b+x_i) \cdot \sqrt{(y+a)^2 + (b-x_i)^2 + (p-h)^2} + (b-x_i) \cdot \sqrt{(y+a)^2 + (b+x_i)^2 + (p-h)^2} \right]}{\left[(x_i+b)^2 + (y+a)^2 + (p-h)^2 \right]^{1/2} \cdot \left[(-x_i+b)^2 + (y+a)^2 + (p-h)^2 \right]^{1/2} \cdot ((y+a)^2 + d^2)} \right] + \\ + \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{(b+x_i) \cdot \left[(y+a) \cdot \sqrt{(y-a)^2 + (b+x_i)^2 + (p-h)^2} + (a-y) \cdot \sqrt{(y+a)^2 + (b+x_i)^2 + (p-h)^2} \right]}{\left[(x_i+b)^2 + (y+a)^2 + (p-h)^2 \right]^{1/2} \cdot \left[(x_i+b)^2 + (y-a)^2 + (p-h)^2 \right]^{1/2} \cdot ((b+x_i)^2 + d^2)} + \right. \\ \left. + \frac{(b-x_i) \cdot \left[(y+a) \cdot \sqrt{(y-a)^2 + (b-x_i)^2 + (p-h)^2} + (a-y) \cdot \sqrt{(y+a)^2 + (b+x_i)^2 + (p-h)^2} \right]}{\left[(-x_i+b)^2 + (y+a)^2 + (p-h)^2 \right]^{1/2} \cdot \left[(-x_i+b)^2 + (y-a)^2 + (p-h)^2 \right]^{1/2} \cdot ((b-x_i)^2 + d^2)} \right] \quad (3.14)$$

En la figura 3.4 se muestran las gráficas de los valores medidos por nueve magnetómetros ($M1$, $M2$, $M3$, $M4$, $M5$, $M6$, $M7$, $M8$ y $M9$ en las posiciones, x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 , x_6 , x_7 , x_8 y x_9 , respectivamente) separados tres metros entre sí y situados a nueve metros de distancia de una espira de dimensiones $a = 2,5 \text{ m}$ y $b = 3 \text{ m}$ y con una corriente de un amperio.

El estudio de la espira XY se puede generalizar para cualquier punto $\vec{r} = (x_i, y, p) = (x, y, z)$ por lo que podemos saber el campo para cualquier espira plana rectangular haciendo un cambio de sistema de referencia del punto respecto del de dicha espira.

Para espiras longitudinales tipo L y transversales tipo T , se deberá realizar el siguiente cambio:

$$\begin{aligned} \text{Bobina L: } & \begin{cases} x = x \\ y = z \\ z = -y \end{cases} \\ \text{Bobina T: } & \begin{cases} x = z \\ y = y \\ z = -x \end{cases} \end{aligned} \quad (3.15)$$

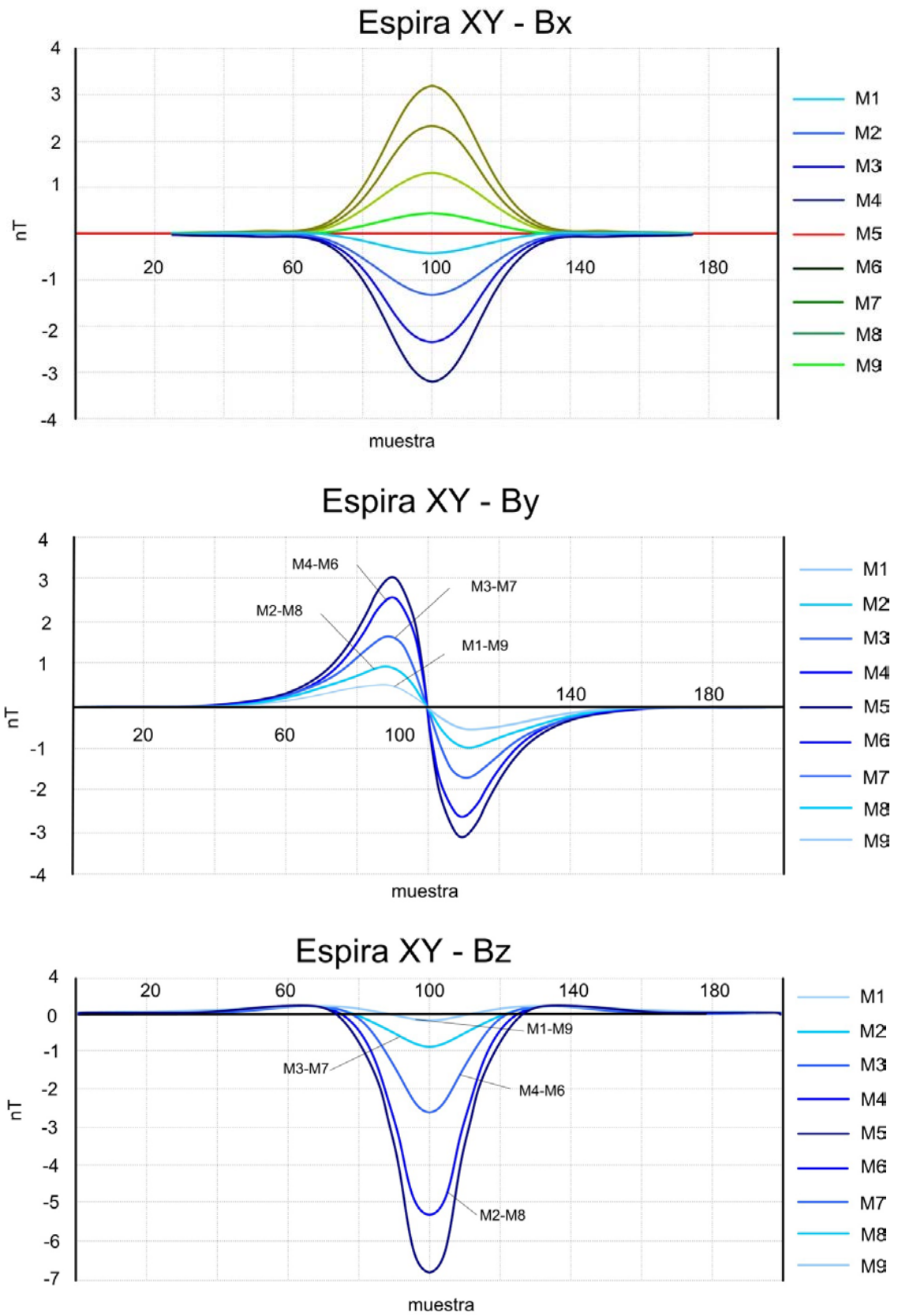


Figura 3.4 Inducción magnética de una espira plana XY (B_x , B_y , B_z).

3.3.2 Hilo Finito

En realidad, cuando las espiras se instalan en un buque no siempre se pueden instalar tal y como se concibieron en la fase de diseño. Por ello, las espiras no siempre son rectangulares y están compuestas por una serie de tramos lineales que cierran el circuito de corriente. A continuación se va a estudiar un hilo finito de corriente, y será éste el elemento básico de una espira.

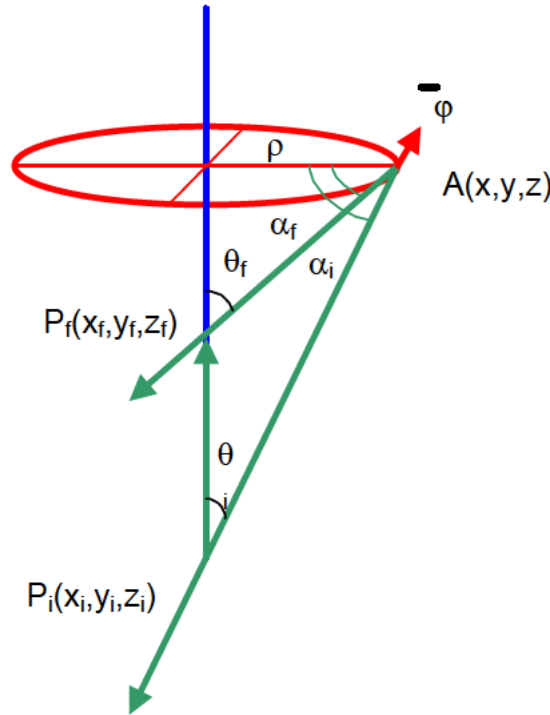


Figura 3.5. Hilo finito de corriente.

Un diferencial de hilo de corriente (figura 3.5) produce en un punto $A(x, y, z)$ la inducción magnética:

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{dl \cdot \sin \theta}{r^2} \cdot \hat{\varphi} \quad (3.16)$$

por lo que la inducción magnética total generada por el hilo en dicho punto será:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot \rho} \cdot \int_{\alpha_i}^{\alpha_f} \cos \alpha \cdot d\alpha \cdot \hat{\varphi} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot \rho} \cdot [\sin \alpha_f - \sin \alpha_i] \cdot \hat{\varphi}$$

$$\alpha = 90^\circ - \theta \quad (3.17)$$

Los valores de α , ρ y $\hat{\varphi}$ tienen una expresión analítica que se obtiene haciendo uso del cálculo vectorial como se muestra a continuación.

Siguiendo la ecuación (3.17) se calculará en primer lugar el valor de la mínima distancia entre el punto dónde se desea calcular la inducción magnética y la recta que une los dos puntos extremos del hilo finito de corriente considerado.

$$\rho = \left| \vec{AP_i} \right| \cdot \cos \alpha_i = \left| \vec{AP_f} \right| \cdot \cos \alpha_f \quad (3.18)$$

Como se ve en (3.18) se puede calcular ρ utilizando el punto inicial o el final. Se va a usar el punto inicial P_i porque es el punto origen de la corriente, es decir, la corriente va desde el punto inicial al punto final. El módulo del vector que une el punto inicial con el punto dónde queremos calcular el campo magnético será:

$$\left| \vec{AP_i} \right| = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (3.19)$$

Existe una relación entre los ángulos α y θ , siendo ésta $\alpha = 90^\circ - \theta$. Las relaciones trigonométricas de α quedará como sigue:

$$\cos \alpha = \cos(90^\circ - \theta) = \sin \theta = \sqrt{1 - \cos^2 \theta} \quad (3.20)$$

$$\sin \alpha = \sin(90^\circ - \theta) = \cos \theta \quad (3.21)$$

O sea, calculando sólo la relación $\cos \theta$ tendremos los valores del $\sin \alpha$ y $\cos \alpha$:

$$\cos \theta_i = \frac{\vec{AP_i} \cdot \vec{P_f P_i}}{\left| \vec{AP_i} \right| \cdot \left| \vec{P_f P_i} \right|} = \frac{(x_i - x) \cdot (x_f - x_i) + (y_i - y) \cdot (y_f - y_i) + (z_i - z) \cdot (y_f - y_i)}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \cdot \sqrt{(x_i - x_f)^2 + (y_i - y_f)^2 + (z_i - z_f)^2}} \quad (3.22)$$

$$\cos \theta_f = \frac{\vec{AP_f} \cdot \vec{P_f P_i}}{\left| \vec{AP_f} \right| \cdot \left| \vec{P_f P_i} \right|} = \frac{(x_f - x) \cdot (x_f - x_i) + (y_f - y) \cdot (y_f - y_i) + (z_f - z) \cdot (y_f - y_i)}{\sqrt{(x_f - x)^2 + (y_f - y)^2 + (z_f - z)^2} \cdot \sqrt{(x_i - x_f)^2 + (y_i - y_f)^2 + (z_i - z_f)^2}} \quad (3.23)$$

Una vez calculadas las relaciones trigonométricas de los ángulos caracterizados sólo quedaría calcular las componentes del vector unitario que lleva la dirección del campo magnético. Este vector será el vector director del plano que forman los tres puntos involucrados en el problema. Su dirección y sentido se calculará según el producto vectorial de la ecuación (3.24).

$$\hat{\varphi} = \vec{P_i P_f} \times \vec{AP_i} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ x_f - x_i & y_f - y_i & z_f - z_i \\ x - x_i & y - y_i & z - z_i \end{vmatrix} \cdot \frac{1}{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \cdot \sqrt{(x_i - x_f)^2 + (y_i - y_f)^2 + (z_i - z_f)^2}} \quad (3.24)$$

A partir de la secuencia de puntos P_i y P_f que describe la geometría de una bobina se calcula la inducción magnética en cualquier punto del espacio. En general, para toda la secuencia de puntos de las bobinas que conforman el SDG de un buque la densidad de flujo magnético en cualquier punto del espacio tendrá la siguiente expresión deducida a partir de (3.3):

$$\begin{aligned}
 \vec{B}[B]_{DEG}^h &= \sum_{K=V,L,T} \sum_{S=P,I} \vec{B}\{B_K\}_S(x, y, z) \cdot n_{KS} \cdot i_{KS} \cdot \lambda_{KS}^h \Big|_{Z_0} = \\
 &= \sum_{K=V,L,T} \sum_{S=P,I} \vec{B} \left\{ \sum_{i=1}^t \text{Hilo}(P_i, P_{i+1})_K \right\}_S (x, y, z) \cdot n_{KS} \cdot i_{KS} \cdot \lambda_{KS}^h \Big|_{Z_0}
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Dónde $\vec{B} \left\{ \sum_{i=1}^t \text{Hilo}(P_i, P_{i+1})_K \right\}_S (x, y, z)$, es la inducción magnética creada por un hilo rectilíneo de corriente finito situado entre los puntos P_i y P_{i+1} .

3.4. Compensación magnética y corrientes de equilibrio

La perturbación magnética que produce un buque en el campo magnético de la Tierra se puede compensar utilizando un sistema de *degaussing* (*SDG*) como ya se describió anteriormente. La compensación magnética se consigue al aplicar las corrientes de equilibrio a las bobinas del *SDG*. Aunque la evolución tecnológica de los *SDG* permite actuar sobre las corrientes de cada bobina para llegar a la compensación, en general, hay que hablar de *amperios x vuelta* de equilibrio ya que también se tienen que modificar a veces, y no sin esfuerzo, el número de espiras de cada bobina. Este incremento o disminución de espiras se realiza en una caja de interconexión que gobierna cada bobina ya que las espiras siempre existen físicamente, lo que varía es la forma de conexión entre ellas.

Para iniciar la compensación se necesita partir de una situación inicial. Esta puede ser partiendo de cero, es decir, comenzando de la medida de la inducción magnética con el *SDG* desconectado, o partiendo de una situación intermedia, o lo que es lo mismo, de una calibración realizada anteriormente. En todos los casos el procedimiento a aplicar es iterativo ya que intervienen muchas variables en la solución del problema, además de que el modelo magnético utilizado para calcular las componentes magnéticas no es exacto. Mejores soluciones se obtendrán cuanto mejor sea el modelo disponible.

Una vez se tiene la situación de partida se debe conocer el llamado efecto bobina por amperio o efecto espira por amperio-vuelta. Hay que conocer el campo magnético que producirá cada bobina para poder calcular cuántos amperios y cuantas espiras serían necesarias para compensar el campo magnético del buque en la zona de influencia de la bobina. Se puede utilizar un modelo magnético o medir dicho efecto en la estación de calibración donde se pretende calibrar el buque. Esto último se realiza haciendo pasar al buque por un polígono de medidas teniendo sólo una de las bobinas activadas. El resultado obtenido se resta de la medida realizada a mismo rumbo del buque con el *SDG* apagado. Dependiendo del *SDG* también es posible que la mejor forma de medir estos efectos sea partiendo de una situación con corrientes en todas las bobinas y cortocircuitando o dejando en circuito abierto (dependiendo de la configuración del *SDG*) una a una todas ellas.

Una vez se tiene el efecto bobina ya se está en condiciones de compensar la perturbación magnética del buque haciendo uso de la ecuaciones (2.13) y (3.3).

$$\begin{aligned}
 \vec{B}'[S]_{SDGON}^{h(\varphi_p, \varphi_s)}(x, y, z_0) &= \vec{B}'[S]^{h(\varphi_p, \varphi_s)}(x, y, z_0) + \vec{B}[B]_{SDG}^h = \\
 &= \sum_{S=P,I} [\{\beta_s\}]^{h(\varphi_p, \varphi_s)} \vec{B}\{S\}_S(x, y, z_0) + \\
 &+ \sum_{K=V,L,T} \sum_{S=P,I} \vec{B}\{B_K\}_S(x, y, z_0) \cdot n_{KS} \cdot i_{KS} \cdot \lambda_{KS}^h \Big|_{z_0} = \\
 &= \sum_{S=P,I} \sum_{m=x,y,z} [\{\beta_{Sm}\}]^{h(\varphi_p, \varphi_s)} \cdot \vec{B}\{M_{Sm}\}(x, y, z_0) + \\
 &+ \sum_{K=V,L,T} \sum_{S=P,I} \vec{B}\{B_K\}_S(x, y, z_0) \cdot n_{KS} \cdot i_{KS} \cdot \lambda_{KS}^h \Big|_{z_0}
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

Dónde,

$\vec{B}'[S]_{SDGON}^{h(\varphi_p, \varphi_s)}(x, y, z_0)$ es el campo magnético del buque medido a una profundidad Z_0 con el sistema de *degaussing* energizado (*SDGON*).

$\vec{B}'[S]^{h(\varphi_p, \varphi_s)}(x, y, z_0)$ es el campo magnético del buque sin que haya habido compensación por ninguna de las bobinas del sistema de *degaussing*.

$\vec{B}[B]_{SDG}^h$ es el campo magnético producido por las bobinas del sistema de *degaussing* del buque cuando está energizado.

Debido a la complejidad de la expresión (3.26) se va a estudiar el mecanismo de la compensación por componentes con las siguientes consideraciones:

- Los ángulos de cabeceo, balanceo, guiñada y abatimiento son nulos.
- Se utilizarán rumbos iguales a los Norte, Sur, Este y Oeste magnéticos.
- Las bases lineales de los magnetómetros estarán en dirección ortogonal a los rumbos de pasada. Es decir, harán falta dos líneas de sensores, una en dirección Este-Oeste magnético para las pasadas Norte-Sur Magnético y otra Norte-Sur magnético para las pasadas Este-Oeste magnético.

La componente z de la densidad de flujo magnético producida por las diferentes magnetizaciones del buque tendrá una ecuación de equilibrio o ecuación de compensación del campo magnético producido por el buque. Dicha ecuación queda expresada en (3.27).

$$\begin{aligned}
 B'_z [S]_{SDGON}^h(x, y, z_0) &= B'_z [S]^h(x, y, z_0) + B_z [B]_{SDG}^h \\
 B'_z [S]^h(x, y, z_0) &= \sum_{m=X,Y,Z} \sum_{S=P,I} B_z \{M_{Sm}\}(x, y, z_0) \cdot \beta_{Sm}^h \Big|_{z_0} \\
 B_z [B]_{SDG}^h &= \sum_{K=V,L,T} \sum_{S=P,I} B_z \{B_K\}_S(x, y, z_0) \cdot n_{KS} \cdot i_{KS} \cdot \lambda_{KS}^h \Big|_{z_0}
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

Como la zona de operación es igual a la zona de calibración los factores λ y β , debido al rumbo y a la zona geográfica dónde el buque quiere compensar la perturbación magnética, sólo estará afectado por el rumbo de cada pasada, por lo que (3.27) quedará de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 B'_z [S]_{SDGON}^h(x, y, z_0) &= B'_z [S]^h(x, y, z_0) + B_z [B]_{SDG}^h \\
 B'_z [S]^h(x, y, z_0) &= \sum_{m=X,Y,Z} \sum_{S=P,I} B_z \{M_{Sm}\}(x, y, z_0) \cdot \beta_{Sm}^h \\
 B_z [B]_{SDG}^h &= \sum_{K=V,L,T} \sum_{S=P,I} B_z \{B_K\}_S(x, y, z_0) \cdot n_{KS} \cdot i_{KS} \cdot \alpha_{KS}^h \\
 \beta_{Sm}^h, \alpha_{KS}^h &\in [-1, 1]
 \end{aligned} \tag{3.28}$$

Desarrollando para la componente B'_z :

$$\begin{aligned}
 B'_z(h) &= B_z \{M_{Px}\} \cdot \beta_{Px}^h + B_z \{M_{Py}\} \cdot \beta_{Py}^h + B_z \{M_{Pz}\} \cdot \beta_{Pz}^h + \\
 &+ B_z \{M_{Ix}\} \cdot \beta_{Ix}^h + B_z \{M_{Iy}\} \cdot \beta_{Iy}^h + B_z \{M_{Iz}\} \cdot \beta_{Iz}^h
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

De la misma manera estas expresiones se pueden utilizar para las componentes x e y :

$$\begin{aligned}
 B'_y(h) &= B_y \{M_{Px}\} \cdot \beta_{Px}^h + B_y \{M_{Py}\} \cdot \beta_{Py}^h + B_y \{M_{Pz}\} \cdot \beta_{Pz}^h + \\
 &+ B_y \{M_{Ix}\} \cdot \beta_{Ix}^h + B_y \{M_{Iy}\} \cdot \beta_{Iy}^h + B_y \{M_{Iz}\} \cdot \beta_{Iz}^h
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

$$\begin{aligned}
 B'_x(h) &= B_x \{M_{Px}\} \cdot \beta_{Px}^h + B_x \{M_{Py}\} \cdot \beta_{Py}^h + B_x \{M_{Pz}\} \cdot \beta_{Pz}^h + \\
 &+ B_x \{M_{Ix}\} \cdot \beta_{Ix}^h + B_x \{M_{Iy}\} \cdot \beta_{Iy}^h + B_x \{M_{Iz}\} \cdot \beta_{Iz}^h
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

La componente z de la densidad de flujo magnético producida por las diferentes magnetizaciones del buque definidas en (2.12) en función del rumbo magnético h del buque referido al norte magnético será:

$$\begin{aligned}
 B'_z(h) &= B_z \{M_{Px}\} + B_z \{M_{Py}\} + B_z \{M_{Pz}\} + B_z \{M_{Ix}\} \cdot \sin(h) + \\
 &+ B_z \{M_{Iy}\} \cdot \cos(h) + B_z \{M_{Iz}\}
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

Para los rumbos de 0° y 180° , la componente inducida longitudinal cambia de signo,

$$B'_z(0^\circ) = B_z\{M_{Px}\} + B_z\{M_{Py}\} + B_z\{M_{Pz}\} + B_z\{M_{Ix}\} + B_z\{M_{Iz}\} \quad (3.33)$$

$$B'_z(180^\circ) = B_z\{M_{Px}\} + B_z\{M_{Py}\} + B_z\{M_{Pz}\} - B_z\{M_{Ix}\} + B_z\{M_{Iz}\} \quad (3.34)$$

Para los rumbos de 90° y 270° , la componente inducida transversal cambia de signo,

$$B'_z(90^\circ) = B_z\{M_{Px}\} + B_z\{M_{Py}\} + B_z\{M_{Pz}\} + B_z\{M_{Ix}\} + B_z\{M_{Iz}\} \quad (3.35)$$

$$B'_z(270^\circ) = B_z\{M_{Px}\} + B_z\{M_{Py}\} + B_z\{M_{Pz}\} - B_z\{M_{Ix}\} + B_z\{M_{Iz}\} \quad (3.36)$$

Luego,

$$\begin{aligned} B'_z(0^\circ) + B'_z(180^\circ) &= 2 \cdot (B_z\{M_{Px}\} + B_z\{M_{Py}\} + B_z\{M_{Pz}\} + B_z\{M_{Iz}\}) \\ B'_z(0^\circ) - B'_z(180^\circ) &= 2 \cdot B_z\{M_{Ix}\} \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} B'_z(90^\circ) + B'_z(270^\circ) &= 2 \cdot (B_z\{M_{Px}\} + B_z\{M_{Py}\} + B_z\{M_{Pz}\} + B_z\{M_{Iz}\}) \\ B'_z(90^\circ) - B'_z(270^\circ) &= 2 \cdot B_z\{M_{Ix}\} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Como se ve en (3.32) y (3.33) sólo existen dos componentes que pueden extraerse de las pasadas por la base de sensores. Estas componentes son las únicas consideradas como verdaderas y las que deben compensarse en primer lugar.

El modelo de buque utilizado será el responsable de extraer las componentes magnéticas del buque mediante combinación de las medidas del campo magnético medido a diferentes rumbos. Por ejemplo, para el modelo *MDS* se pueden calcular cada una de estas componentes ya que la densidad de flujo magnético medida por el sensor vertical tendrá las siguientes características:

- El producido por la magnetización vertical es una función par respecto al centro del buque en la dirección de la pasada.
- El producido por la magnetización longitudinal es una función impar respecto al centro del buque en la dirección de la pasada.
- El producido por la magnetización transversal es una función impar respecto al centro del buque en la dirección de la línea de magnetómetros. Además la magnetización permanente cambia de banda en pasadas ortogonales desde el punto de vista de

sensores opuestos. También tienen la propiedad de valer cero en el magnetómetro de quilla.

Las otras dos componentes de la densidad de flujo magnético se obtienen de una formulación idéntica a la anterior.

La calibración magnética se hace en tres dimensiones ya que se utilizan bobinas cuya inducción magnética la producen en cada uno de los tres ejes cartesianos de referencia magnéticos del buque (ver capítulo 2). En definitiva, como el silencio magnético se busca en campo lejano (distancia igual o superior a la manga del buque) se ha simplificado el modelo magnético del buque a una descomposición dipolar en tres direcciones ortogonales. Esta simplificación está relacionada con la necesidad de montaje a bordo de bobinas de compensación en la etapa de construcción del mismo que sean compatibles con el diseño estructural del buque.

Capítulo 4

Aplicación de los Algoritmos Genéticos a la compensación magnética

4.1. Introducción

Los algoritmos genéticos son algoritmos de búsqueda que adoptan los principios básicos de la evolución natural. Estos algoritmos han probado ser muy eficientes en aplicaciones de optimización de dispositivos electromagnéticos [1, 7, 8].

Las variables del problema se codifican en cadenas de longitud fija, llamadas cromosomas. Cada posición dentro de cada cadena se llama gen y sus posibles valores se llaman alelos. En los algoritmos genéticos (GAS) estándar los cromosomas son cadenas de bit.

La población de individuos contiene un número finito de cromosomas. Cada cromosoma tiene un valor de adaptación que mide su habilidad a sobrevivir y producir descendientes. Este valor de adaptación se calcula por medio de una función objetivo que modeliza su capacidad para desarrollarse en el entorno en el cual la población evoluciona.

La población inicial se crea aleatoriamente. La evolución de las generaciones se realiza por medio de tres operadores fundamentales, *selección*, *cruce* y *mutación* [15, 2, 1, 7, 5]. El operador *selección* elige estocásticamente los individuos que actuarán como padres y se reproducen de acuerdo a su adaptabilidad. El operador *cruce* intercambia código genético entre los padres seleccionados para dar lugar a los descendientes, es decir, se intercambian subcadenas cromosómicas para generar nuevas cadenas hijas. El operador *mutación* cambia un gen a uno de sus posibles alelos. La probabilidad de *mutación* es menor que la de *cruce*. Ambos operadores producen cambios en los nuevos cromosomas, los cuales reemplazan los existentes en la nueva población. Los cromosomas que sobreviven serán aquellos que se adaptan mejor al objetivo. El algoritmo llega a su fin cuando cumple la condición de convergencia o se ha alcanzado el número máximo de iteraciones.

El objetivo es mejorar los resultados de la compensación de la firma magnética de un buque respecto al que se le aplican otros algoritmos tradicionales de minimización mínimos reduciendo simultáneamente su nivel de pico y su gradiente.

4.2. Tipo de Algoritmo Genético utilizado

Uno de los principales problemas a la hora de implementar un GA es decidir cuáles van a ser los valores de los parámetros involucrados. En nuestro caso utilizaremos la configuración que a continuación se detalla:

Esquema de representación: se ha utilizado un alfabeto binario de longitud finita. La longitud de cada parámetro estará fijada por los valores máximos y mínimos de cada uno de ellos y por la precisión o número de decimales que permite el sistema de compensación magnética. La longitud de cada uno de los cromosomas de la población dependerá de los parámetros anteriores. Por último, se deben mapear los valores binarios posibles entre los valores posibles de los parámetros para decodificar cada uno de los parámetros.

El número de bits que representarán a cada bobina se calculará según la ecuación (4.1).

$$\begin{aligned} 2^{l_{n_{ks}}} &\geq \text{número posible de espiras} = 2 \cdot n_{\max} + 1 \\ l_{n_{ks}} &\geq \log_2(2 \cdot n_{\max} + 1); l_{n_{ks}} \text{ entero} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Dónde n_{\max} es el número de espiras máximas que pueden conectarse al circuito de la bobina **KS**. El factor dos aplicado está relacionado con la capacidad de invertir el conexionado de las espiras por lo que el número máximo de espiras oscilará entre $-n_{\max}$ y n_{\max} . El valor de $l_{n_{ks}}$ es la longitud binaria del número de espiras posibles de la bobina **KS**.

Lo mismo ocurre con los valores de corriente posible de cada bobina **KS**, aunque en este caso también se tiene en cuenta la precisión que permite el *SDG*. El número de bits que representa el intervalo de corriente que puede aplicarse a cada bobina se calculará según la ecuación (4.2).

$$\begin{aligned} 2^{L_{i_{ks}}} &\geq \text{valores posibles de corriente} = \\ &= 2 \cdot (i_{\max} \cdot N_{\text{decimales}} \cdot 10) + 1 \\ L_{i_{ks}} &\geq \log_2(2 \cdot (i_{\max} \cdot N_{\text{decimals}} \cdot 10) + 1); L_{i_{ks}} \text{ entero} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Dónde i_{\max} es la corriente máxima que puede aplicarse a la bobina **KS**. $N_{\text{decimales}}$ es el número de decimales de corriente que puede entregar la fuente, es decir, depende de la precisión de la fuente de corriente. El valor de $L_{i_{ks}}$ es la longitud binaria que representa a los valores de corriente que pueden circular por la bobina **KS**.

Una vez que se conoce el número de bits necesario para codificar las variables que afectan a cada bobina se construyen los cromosomas que representan a los individuos de la población. Cada individuo tendrá un cromosoma cuya longitud binaria corresponderá a la suma de las longitudes binarias que representan al número de espiras y corriente máximas de cada bobina. La longitud de cada cromosoma vendrá dada por la expresión (4.3).

$$\begin{aligned} \text{Cromosoma}_2 &= \sum_{K=V,L,T} \sum_{S=P,I} \text{Str}_2[n_{KS}] \& \text{Str}_2[i_{KS}] \\ \text{Longitud}[\text{Cromosoma}_2] &= \sum_{K=V,L,T} \sum_{S=P,I} \text{Longitud}[\text{Str}_2[n_{KS}]] + \\ &\quad + \text{Longitud}[\text{Str}_2[i_{KS}]] \end{aligned} \quad (4.3)$$

Dónde $\text{Str}_2[n_{KS}]$ es la cadena binaria que representa al número de espiras de la bobina **KS** y $\text{Str}_2[i_{KS}]$ representa a la cadena binaria de la corriente que atraviesa la bobina **KS**.

Todos los cromosomas binarios son generados inicialmente y evolucionan según marcan los parámetros que rigen la evolución. Para calcular posteriormente la adaptabilidad de cada uno de los individuos se debe decodificar cada parámetro (subcadena binaria) de todos los que constituyen el cromosoma que lo representa. La ecuación (4.4) establece el valor decimal real de cada subcadena binaria.

$$\begin{aligned} \text{Valor real parámetro 'i'} &= \min + \frac{\text{Dec}\{\text{Str}_2\}_i \cdot (\max - \min)}{2^{l_{p_{ks}}} - 1}, \\ l_{p_{ks}} &= l_{n_{ks}}, l_{i_{ks}} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Dónde $\text{Dec}\{\text{Str}_2\}_i$ es el valor decimal de la subcadena binaria que se corresponde con uno de los parámetros de número de espiras y corriente de la bobina **KS**. Los valores **max** y **min** son los valores decimales máximos y mínimos del parámetros considerado de la bobina **KS**.

Una vez se han establecido todos los parámetros que forman el cromosoma de cada individuo hay que definir el tamaño de la población o número de individuos. En el caso que nos ocupa el tamaño de la población será igual al tamaño de los cromosomas [4]. Las operaciones que intervienen en la generación de nuevas poblaciones se describen a continuación.

Selección: es la responsable de crear una nueva generación a partir de la anterior generación. Está basada en la adaptabilidad de un individuo al objetivo respecto de la adaptabilidad promedio de la población. Esto determina el número de copias que de dicho individuo existirá en la siguiente generación. Los dos mecanismos de selección de individuos utilizados en nuestro estudio son el llamado *roulette wheel* y su derivado *tournament*.

El método de selección de *roulette wheel* se basa en que cada individuo tiene una probabilidad de adaptarse al entorno en función de la adaptabilidad del grupo que compone la población [9].

$$P(I_i) = \frac{\varphi(I_i)}{\sum_{j=1}^n \varphi(I_j)} \quad (4.5)$$

Dónde $\varphi(I_i)$ es la adaptabilidad del Individuo I_i al entorno. Esta adaptabilidad está referida a su capacidad de resolución del problema según los valores de los parámetros que representa cada subcadena del cromosoma. Esta probabilidad $P(I_i)$ será más alta según mejor sea la solución al problema que plantea cada individuo. Al azar se genera un número entre 0 y 1 y se calcula entre qué individuos quedaría dicho número teniendo en cuenta las probabilidades acumuladas de la secuencia de individuos. Se selecciona un individuo I_r para un valor P de probabilidad (figura 4.1) generado aleatoriamente que cumple:

$$\sum_{j=1}^{r-1} P(I_j) \leq P_{random} \leq \sum_{j=1}^r P(I_j) \quad (4.6)$$

El método de selección *tournament* lo que hace es seleccionar dos individuos consecutivamente para descartar el que peor se adapta al medio.

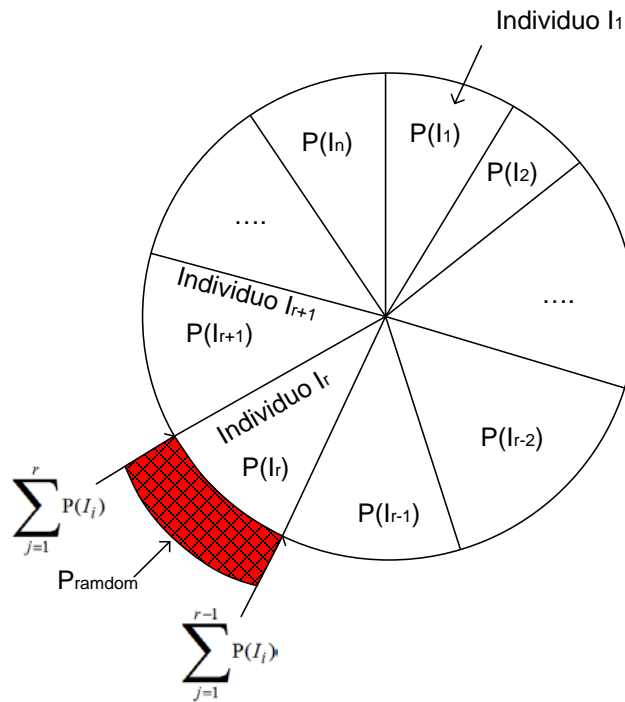


Figura 4.1. Mecanismo de selección según la probabilidad de adaptación.

Escalado: para incrementar la velocidad de convergencia se usa el escalado. Además, en nuestro caso lo utilizamos para invertir la adaptabilidad de los individuos de la población, es decir, buscamos un mínimo de campo magnético por lo que el que mejor se adapta (máxima firma magnética) pasa a ser el peor individuo y viceversa. Esto se realiza porque se busca en nuestro problema minimizar la función objetivo, y así, de esta manera, no se cambia el mecanismo de la evolución, dónde el mejor individuo es el que sobrevive. En otras palabras, buscamos un mínimo en vez de un máximo. Estas funciones de escalado se han obtenido a partir de las conocidas como *lineal*, *truncado sigma* y *exponencial*. A continuación se va a explicar cada una de las funciones de escalado utilizadas partiendo de las definidas en [5, 9].

El escalado *lineal inverso* se basa en distribuir linealmente los valores de la adaptabilidad de los individuos de la población de manera que el más adaptable se convierta en el menos capacitado para continuar la evolución.

Pimeramente se definen los valores f_{min} y f_{μ} que se corresponden con los valores de la adaptabilidad de la población mínimo y promedio, respectivamente. Estos valores se transforman teniendo en cuenta que el valor medio de la función seguirá siendo el mismo y el valor mínimo de la función se escala por una constante c . Estos valores quedan definidos en la ecuación (4.7).

$$\begin{aligned} f'_{min} &= c \cdot f_{\mu} \\ f'_{\mu} &= f_{\mu} \\ \mu &: \text{media} \end{aligned} \quad (4.7)$$

La adaptabilidad f de la población se mapea a un nuevo conjunto de valores escalados f' . Se tendrían los puntos (f_{min}, f'_{min}) y (f_{μ}, f'_{μ}) para obtener la recta de escalado que se muestra en la ecuación (4.8).

$$\begin{aligned} \frac{f' - f'_{\mu}}{f'_{min} - f'_{\mu}} &= \frac{f - f_{\mu}}{f_{min} - f_{\mu}} \\ f' &= \frac{(c-1) \cdot f_{\mu}}{f_{max} - f_{\mu}} \cdot f - \frac{(c-1) \cdot f_{\mu}^2}{f_{max} - f_{\mu}} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Para evitar que el escalado lleve a valores negativos de la adaptabilidad de algún individuo de la población, la ecuación (4.8) se desdoblará en las dos siguientes funciones:

$$f_{max} > \frac{(c-1-f_{min})}{c-1}, \left\{ \begin{aligned} a &= \frac{(c-1) \cdot \mu}{f_{min} - \mu} \\ b &= \frac{\mu \cdot (f_{min} - c \cdot \mu)}{f_{min} - \mu} \end{aligned} \right. \quad (4.9)$$

$$f_{max} \leq \frac{(c-1-f_{min})}{c-1}, \left\{ \begin{aligned} a &= \frac{\mu}{\mu - f_{max}} \\ b &= \frac{-f_{max} \cdot \mu}{\mu - f_{max}} \end{aligned} \right. \quad (4.10)$$

$$f' = a \cdot f + b \quad (4.11)$$

El escalado *truncado sigma inverso* elimina todos los individuos cuya adaptabilidad o habilidad para adaptarse al entorno sea mayor a la media más una o varias desviaciones típicas. El resto de individuos de la población cambiarán su capacidad de adaptación linealmente y con pendiente de -45° , de manera que el que mejor se adapta pasa a ser el que peor lo hace desde el punto de vista de la evolución de la población. El algoritmo que desarrolla este tipo de escalado se muestra en la ecuación (4.12).

$$\begin{aligned}
 f &= \text{Habilidad} - \mu - C \times \sigma \\
 \text{Si } f > 0 \text{ entonces } f' &= 0 \\
 f' &= \text{Abs}(f)
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$

Dónde μ es la media y σ es la desviación típica de la adaptabilidad de los individuos de la población. La figura 4.2 muestra gráficamente la función de escalado *truncado sigma inverso*, dónde se ha supuesto una estadística gaussiana de distribución de la habilidad de adaptación de los individuos al medio. Los valores de la constante de escalado C utilizados son los comprendidos entre 1 y 3 [5].

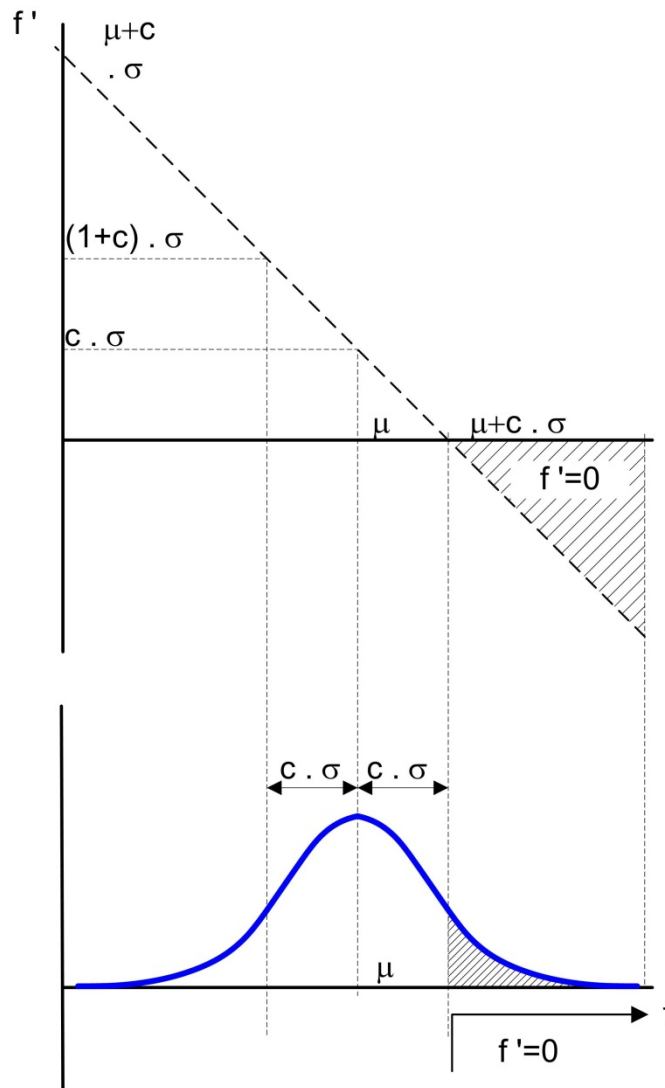


Figura 4.2. Escalado Truncado Sigma Inverso.

El escalado *exponencial* inverso es similar al utilizado en [14] pero haciendo negativo el exponente de la potencia $f' = f^{-k}$. La figura 4.3 muestra como la función de escalado exponencial realiza la inversión.

Cruce: con el mecanismo de cruce los cromosomas intercambian información genética entre padres para dar lugar a los hijos. Este operador simula el proceso de recombinación de la evolución natural. Se ha utilizado el cruce de un único punto. La probabilidad de cruce se ha determinado fija y se sitúa entre los valores 0,6 y 0,9 [1].

Mutación: este mecanismo produce una variación de alguno de los alelos de los individuos de la población entre alguno de los posibles. Se utiliza como parámetro de mutación aquel que produce una alteración de uno de los alelos de al menos unos pocos de los individuos de cada generación [1].

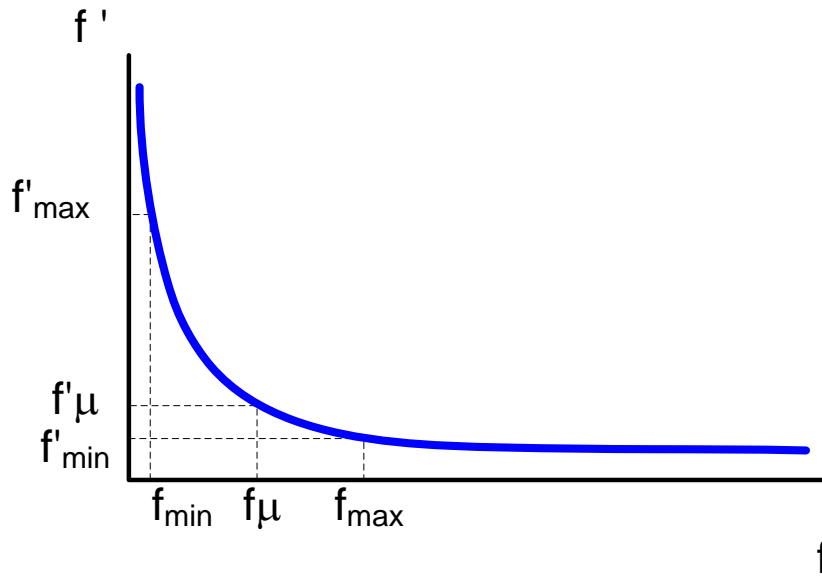


Figura 4.3. Escalado exponencial.

El primer paso es generar una población aleatoriamente, es decir, se generan cadenas binarias de forma estocástica que constituyen los cromosomas. Estas cadenas como se dijo anteriormente, tendrán una longitud dependiente del número de variables y de sus valores posibles o restricciones (4.3).

Una vez que se tiene una generación de individuos se calcula su habilidad de adaptarse a la función objetivo. Se han estudiado tres métodos, *mínimos cuadrados* (4.13), *mínima diferencia* (4.14) y *contención* (4.15).

$$F = \sum_{m=1}^t (B_{\text{objetivo},m} - B_{\text{calculado},m})^2 \quad (4.13)$$

$$F = \sum_{m=1}^t Abs(B_{\text{objetivo},m} - B_{\text{calculado},m}) \quad (4.14)$$

$$F = \sum_{m=1}^t Abs(B_{calculado,m} \subset B_{objetivo,m}) \quad (4.15)$$

Los métodos formulados en (4.13) y (4.14) son bien conocidos. El método de *Contención* (4.15) es un método novedoso utilizado por primera vez en este trabajo. Ha sido especialmente diseñado para el problema que nos ocupa y se basa en que la función calculada después de una evolución no genere rizados en torno a la función objetivo y quede completamente contenida dentro de aquella (4.16).

$$\forall i \begin{cases} Si \ Sgn(Objetivo_i) = Sgn(Calculado_i) \Rightarrow \alpha = Max(\alpha_i) \\ \alpha_i = Objetivo_i / Calculado_i \end{cases} \quad (4.16)$$

$$Variable_i = Variable_i \times \alpha$$

Dónde i es el punto a considerar de la función. $Sgn()$ representa el signo del valor de la función en el punto i . α_i es el factor entre el valor de este punto de la función objetivo y el calculado del individuo. α es el valor máximo de todos los α_i .

Para cada punto i de la función calculada de un individuo de la población se calcula el factor α relacionándolo con el mismo punto de la curva objetivo. El máximo valor de todos los α es el que ponderará a uno de los parámetros que afectan a cada bobina. De esta manera se asegurará que la curva calculada estará siempre contenida dentro de la función objetivo.

A continuación se muestra una comparativa de resultados utilizando la función objetivo por mínimos cuadrados y la de contención de la evolución de un caso de compensación magnética con el método de selección *tournament* y escalado *truncado sigma inverso* de constante c de valor 3. El mejor individuo de la población es aquel cuya diferencia punto a punto con el objetivo a compensar es más pequeña. Como se ve en la gráfica de la figura siguiente el método de mínimos cuadrados converge rápidamente aunque la solución a la que converge en 40 generaciones no es tan buena como el método de contención.

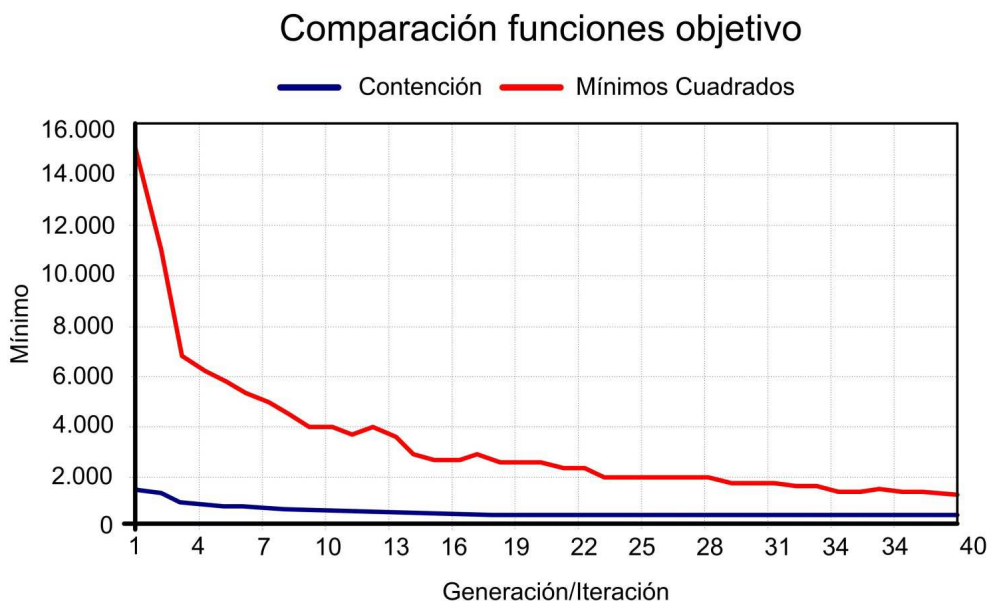


Figura 4.4. Convergencia de las soluciones utilizando *mínimos cuadrados* y *Contención*.

4.3. Aplicando GAS a la compensación magnética de un buque

El algoritmo genético utilizado en nuestro problema es el Algoritmo Genético Simple (SGA). Fundamentalmente, este tipo de algoritmos, se basa en que cada evolución de los individuos que forman la población produce el mismo número de individuos que la anterior. Un esquema del algoritmo utilizado se muestra en la figura 4.5.

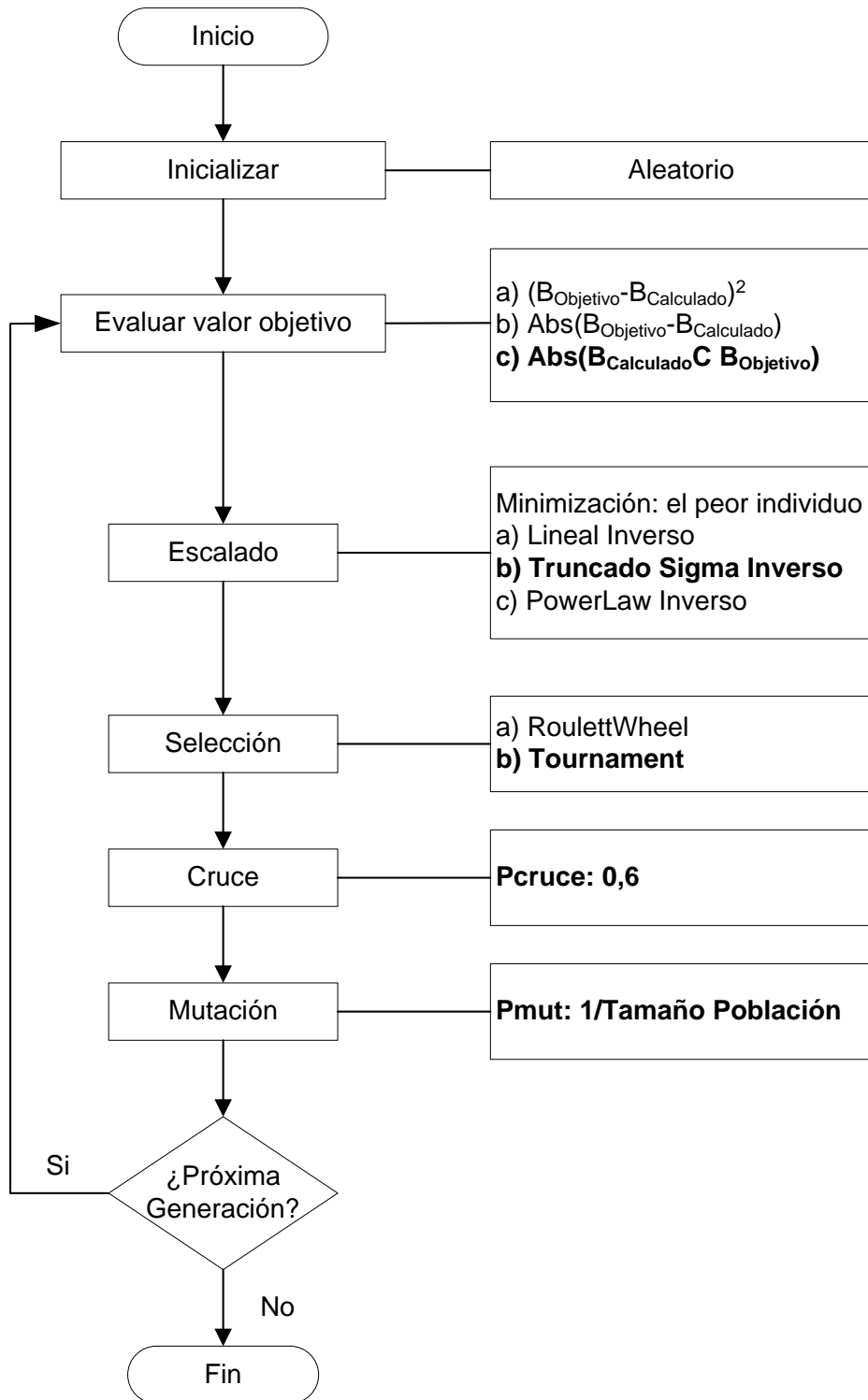


Figura 4.5. Algoritmo Genético utilizado en la compensación magnética.

Antes de iniciar la compensación propiamente dicha se deben establecer tres parámetros fundamentales que serán los que fijen la longitud de los cromosomas binarios, el número de espiras, el máximo de corriente permitido y la precisión que permite el *SDG*. Otros parámetros a fijar son los mecanismos de selección, escalado y evaluación de la función objetivo.

El primer paso en un *GA* es generar una población aleatoriamente, es decir, se generan aleatoriamente cadenas binarias que constituyen los cromosomas de los individuos de la población. Estas cadenas, como se dijo anteriormente, tendrán una longitud dependiente del número de variables y sus valores posibles o restricciones (4.1).

Una vez que se tiene una población de individuos de cromosomas binarios se calcula su habilidad de adaptarse a la curva objetivo según una de las ecuaciones (4.12), (4.13) o (4.14). El método que mejores resultados ha obtenido para nuestra aplicación es el de *Contención* y es el más utilizado por el autor para la resolución de este tipo de problemas.

La habilidad de cada individuo para adaptarse al entorno se escala buscando dos objetivos, el de la convergencia y el de la inversión del objetivo. Es decir, se sigue respetando el mecanismo de la evolución buscando el mejor de los individuos pero al invertir durante el escalado realmente se busca el peor (se busca un mínimo en lugar de un máximo de la función objetivo). Se invierte la capacidad de los individuos a generar nuevos descendientes. Los métodos de escalado utilizados son el *lineal inverso*, el *truncado sigma inverso* y el *exponencial inverso* todos ellos relacionados con los definidos en [5].

Con la población escalada se seleccionan dos individuos que serán los padres de la generación futura. Se han utilizado los métodos *roulette wheel* y *tournament*, siendo este último el que mejores resultados ha dado. Los padres seleccionados proceden al apareamiento mediante dos operaciones básicas, el cruce de código genético entre individuos y la mutación de un alelo de al menos unos pocos individuos de la población [1], es decir, $P_{mut} = 1/Tamaño\ Población$ (P_{mut} es la probabilidad de mutación) ya que el tamaño de la población es igual a la longitud binaria del cromosoma [4]. La combinación de alelos de los padres se realiza por el método de un solo punto de cruce con probabilidad 0,6 para todas las generaciones e individuos [3].

Este procedimiento renueva completamente la población y se vuelve a repetir el proceso evolutivo. El algoritmo termina cuando se ha llegado a una situación de convergencia debida a la variabilidad del promedio de la adaptabilidad de la población en las últimas 5 generaciones o se han completado 40 generaciones.

La compensación magnética de un buque es un método iterativo. Cada iteración implica una pasada por la base de magnetómetros y cuyo resultado ha sido medido en un estado del *SDG*. Los valores de corrientes y número de espiras serán corregidos para cada pasada de forma incremental de manera que los errores introducidos en el proceso tengan cada vez menos influencia conforme se realizan las pasadas sobre los sensores magnéticos.

El algoritmo de compensación magnética de un buque se muestra en el diagrama de la figura 4.6. El buque parte de una situación inicial, ya sea de la situación *SDG OFF* (sistema de *degaussing* desconectado) o de la última situación *SDG ON* de una anterior calibración. Se realiza una pasada por encima de la base de sensores y se capturan los datos. A las lecturas de los sensores se le aplica un modelo magneto estático del buque del que se extraen las componentes debidas a cada una de las magnetizaciones. Cada componente así obtenida se compensa con su correspondiente componente producida por el conjunto de bobinas del *SDG* tal y como se ha descrito en el capítulo 3.

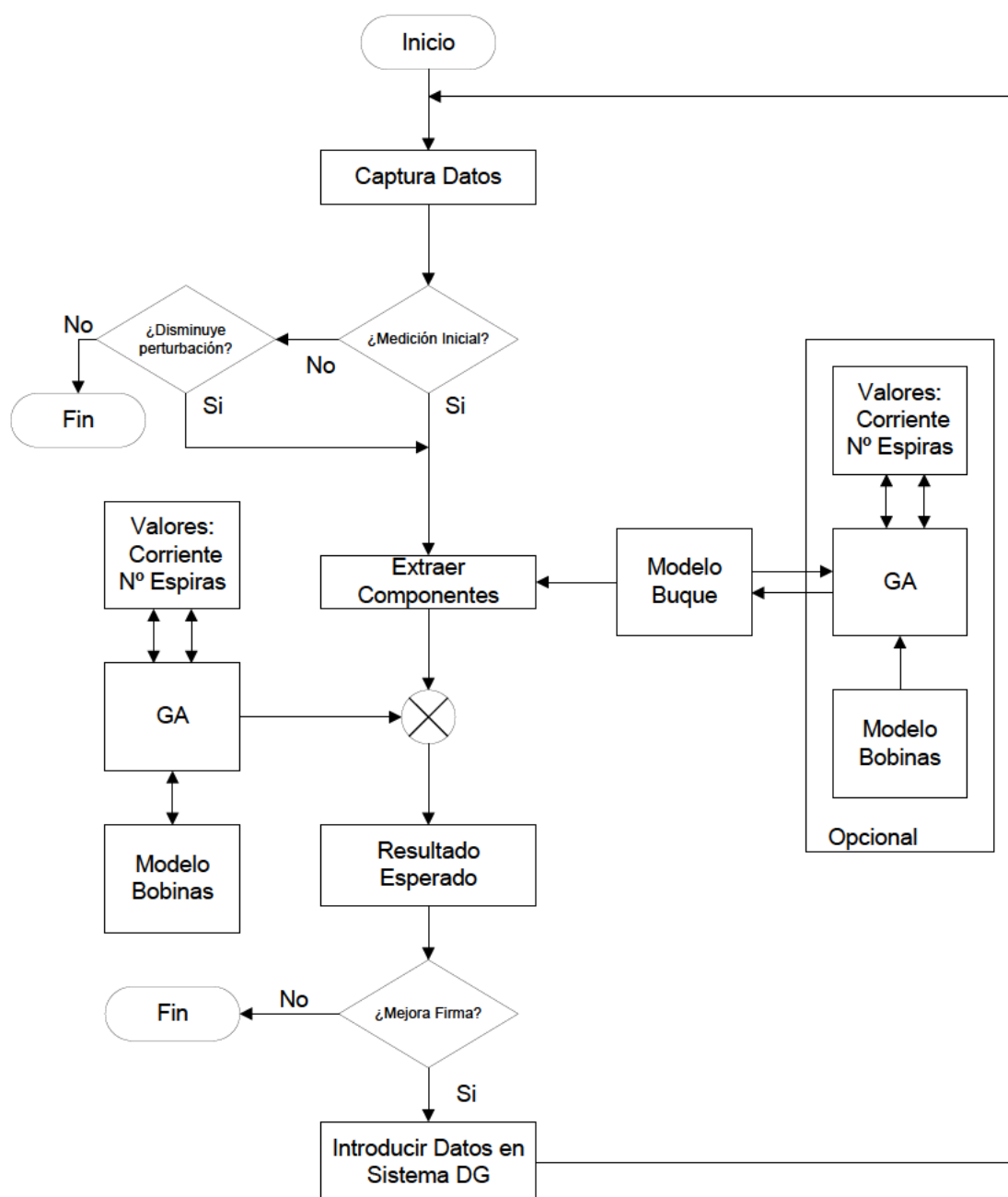


Figura 4.6. Mecanismo de compensación magnética de un buque utilizando *GAS*.

Para calcular los valores de corriente y número de espiras por bobina se aplica el algoritmo genético comentado anteriormente. Los nuevos valores podrán o no mejorar la firma. Todo este procedimiento se va repitiendo hasta que se llegue a un resultado que no se pueda mejorar, bien sea por resultado esperado o por resultado medido por los sensores.

Todos los estados del *SDG* del proceso de calibración magnética de un buque dentro de este procedimiento iterativo se pueden formular generalizando la ecuación (3.26) del estado inicial al paso $n+1$ de la iteración como se expresa en la ecuación (4.18).

$$\vec{B}'[S]_{SDGON}^{h(\varphi_p, \varphi_s)}(x, y, z_0) \Big|_{n+1} = \vec{B}'[S]^{h(\varphi_p, \varphi_s)}(x, y, z_0) + \vec{B}[B]_{SDG}^h \Big|_n + \Delta \vec{B}[B]_{SDG}^h \Big|_{n+1} \quad (4.18)$$

Dónde, $\vec{B}'[S]_{SDGON}^{h(\varphi_p, \varphi_s)}(x, y, z_0) \Big|_{n+1}$ es la inducción magnética del buque esperadas en la pasada $n+1$ con las corrientes calculadas después de la pasada n . $\vec{B}'[S]^{h(\varphi_p, \varphi_s)}(x, y, z_0)$ es la inducción magnética del buque sin corrientes en el *SDG*. $\vec{B}[B]_{SDG}^h \Big|_n$ es la inducción magnética de compensación del sistema de *degaussing* con las corrientes calculadas en la pasada anterior n . $\Delta \vec{B}[B]_{SDG}^h \Big|_n$ es el incremento de la inducción magnética de compensación que el incremento de las corrientes calculadas después de la pasada n minimizaría los valores de firma magnética del buque. Los errores inherentes a la medida descritos en el capítulo 2, los propios de la cadena de medida y los relacionados con el modelo de buque utilizado hacen que los valores de firma magnética esperados en la iteración $n+1$ no coincidan exactamente con los medidos. El proceso de calibración finalizaría cuando no se consigue ninguna mejora en la reducción de firma del buque respecto a la pasada precedente porque la cantidad de firma a compensar es inferior a la suma de los errores comentados.

En la figura 4.7 se presenta un esquema del *SDG* de un buque y la forma que se ha utilizado para parametrizar el problema de minimización de firma magnética mediante la aplicación del algoritmo genético comentado. En esta figura los valores de corriente representan a todos los cromosomas del individuo seleccionado después de cada pasada del buque por la estación de calibración. Se han representado en colores rojo, verde y azul las cadenas cromosómicas binarias de los valores de las corrientes de las bobinas verticales, longitudinales y transversales, respectivamente. Después de cada pasada por la estación de calibración se calculan los valores de las corrientes que deben atravesar cada una de las bobinas del sistema de *degaussing* para minimizar la firma magnética del buque según los valores medidos de campo magnético. Esos valores de corriente representan al individuo que ha sido seleccionado después de aplicar el Algoritmo Genético al problema.

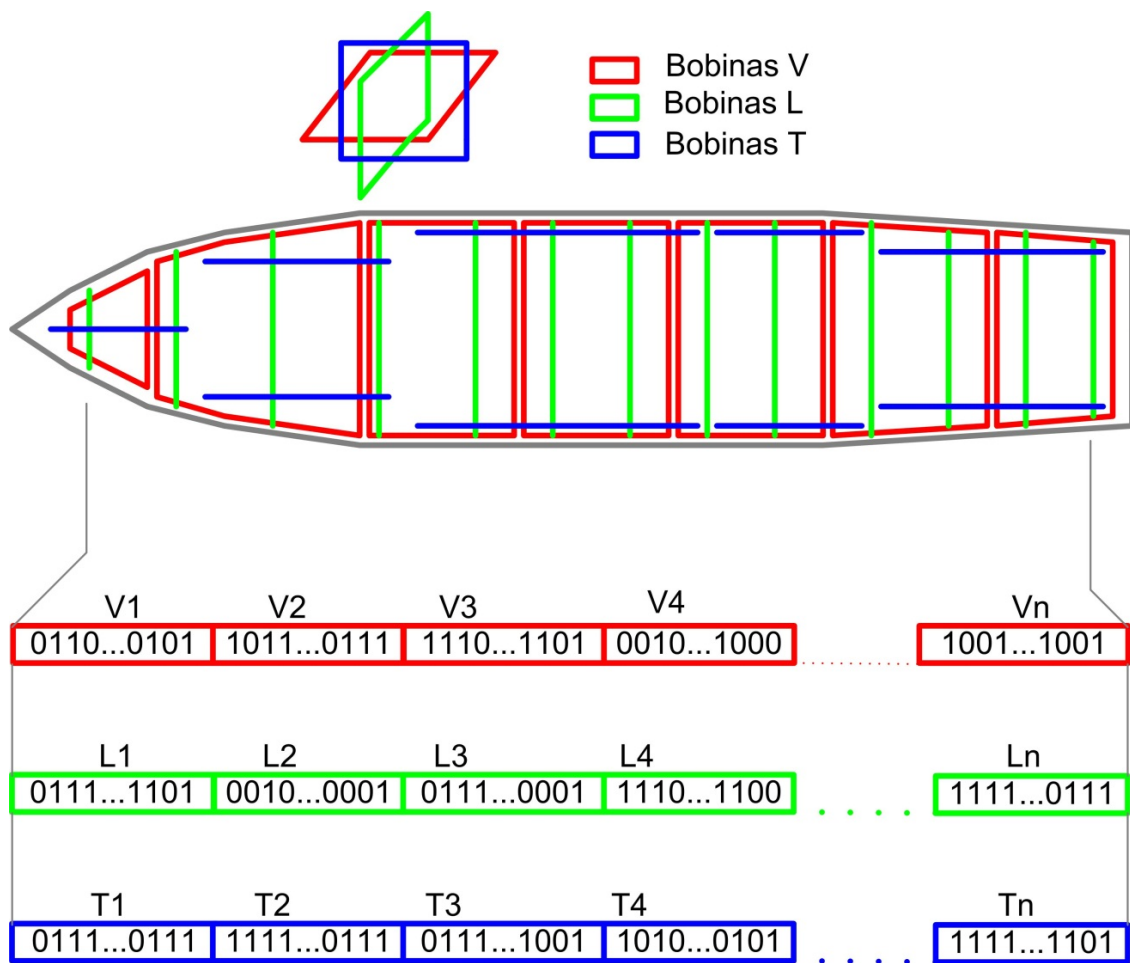


Figura 4.7 Aplicación de los algoritmos genéticos al *SDG* de un buque.

4.4. Resultados

Todo lo expuesto en este trabajo ha sido aplicado de forma exitosa en la compensación magnética de buques. A continuación se van a adjuntar los resultados obtenidos en la compensación de un buque hipotético obtenido de un modelo dipolar compuesto (superposición de varios dipolos). Se partirá del estado con sistema de desmagnetización desconectado y se evaluarán diferentes parámetros del algoritmo genético en la obtención de los resultados.

Se va a aplicar el *GA* teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- La base de sensores magnéticos constará de nueve magnetómetros y se capturarán 200 muestras por sensor, estando la proa del buque en la muestra 51 y la popa en la 150.
- Se van a utilizar sólo los valores de densidad de flujo magnético medido en el eje vertical de los sensores (B_z).
- Se considerará un *SDG* moderno con fuentes controladas de corriente dónde la compensación se realizará sobre la corriente, dejando el cambio de número de espiras para situaciones especiales. En cualquier caso, el parámetro resultante se puede considerar como el producto espiras por corriente por lo que fijando el número de espiras cableadas existentes en las bobinas se podría extraer el valor de la corriente a aplicar [23].
- Se realizarán pasadas en dirección Norte y Sur Magnéticos, por lo que no se podrá compensar el campo inducido transversal.
- Se utilizará la firma de quilla para la compensación vertical y longitudinal por lo que el campo transversal es nulo para el magnetómetro *MG5* (magnetómetro central para el caso de nueve magnetómetros). La magnetización transversal manifestará el máximo medido por la componente vertical del sensor a dos magnetómetros a ambos lados de la quilla. Ver figura 4.8.

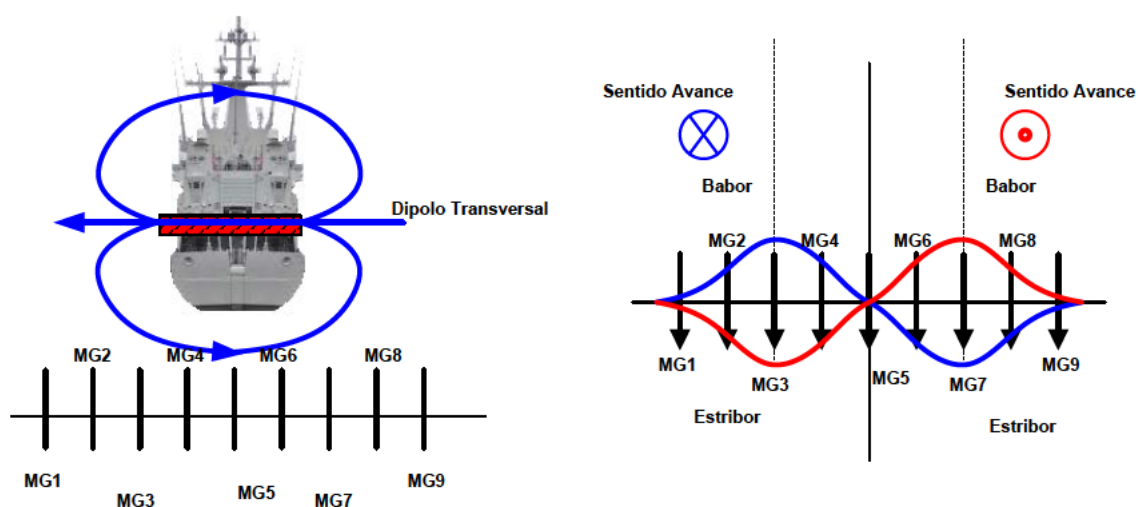


Figura 4.8. Firma de quilla de la magnetización transversal medida por el sensor *MG5*.

- Cada solución de corrientes finalizará después de 40 iteraciones.
- Sólo se compensará la componente debida a la magnetización vertical del buque (permanente e inducida) y a la permanente longitudinal.

Las figuras siguientes muestran gráficamente los efectos de las bobinas V (figura 4.9) y L (figura 4.10) en quilla y las firmas del modelo del buque utilizado para pasadas norte (figura 4.11) y sur geográficos (figura 4.12); siempre B_z . Los valores en el eje X representan el número de muestra; se capturan dos esloras del buque (dos veces su longitud) y se normalizan a 200 puntos de manera que la proa corresponde al punto 51 y la popa al 150.

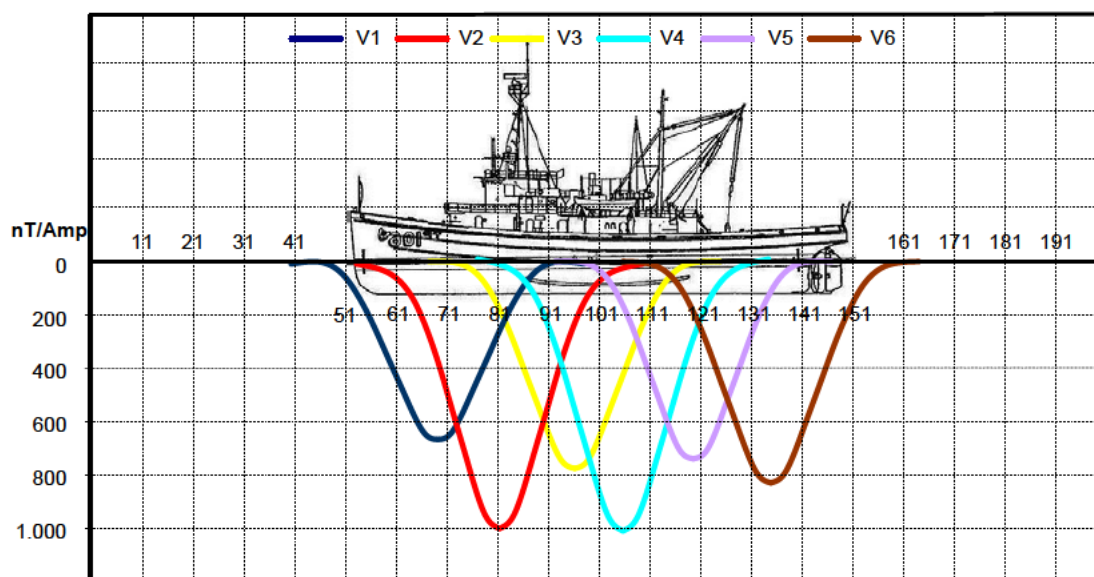


Figura 4.9. Componente B_z de los efectos bobina V .

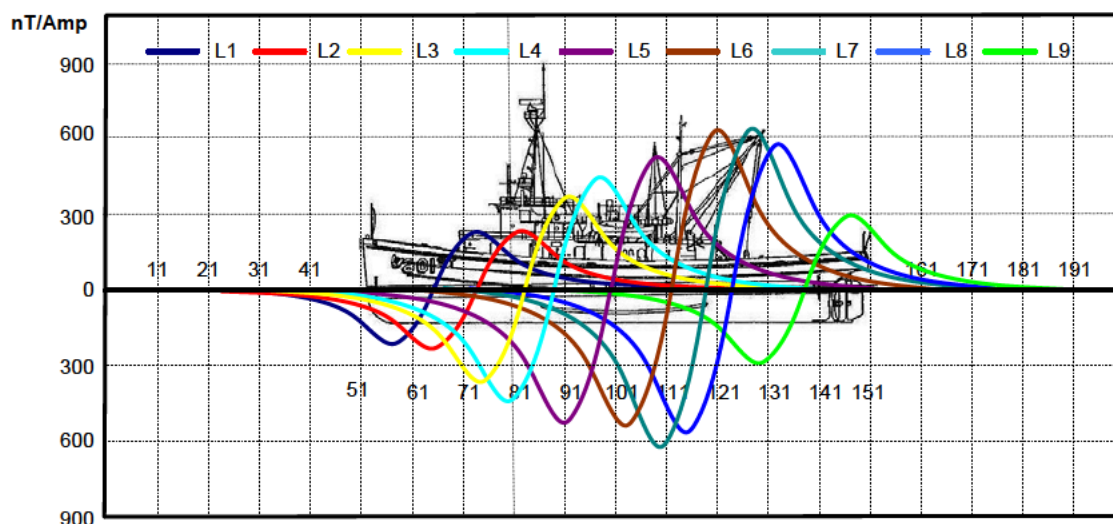


Figura 4.10. Componente B_z de los efectos bobina L .

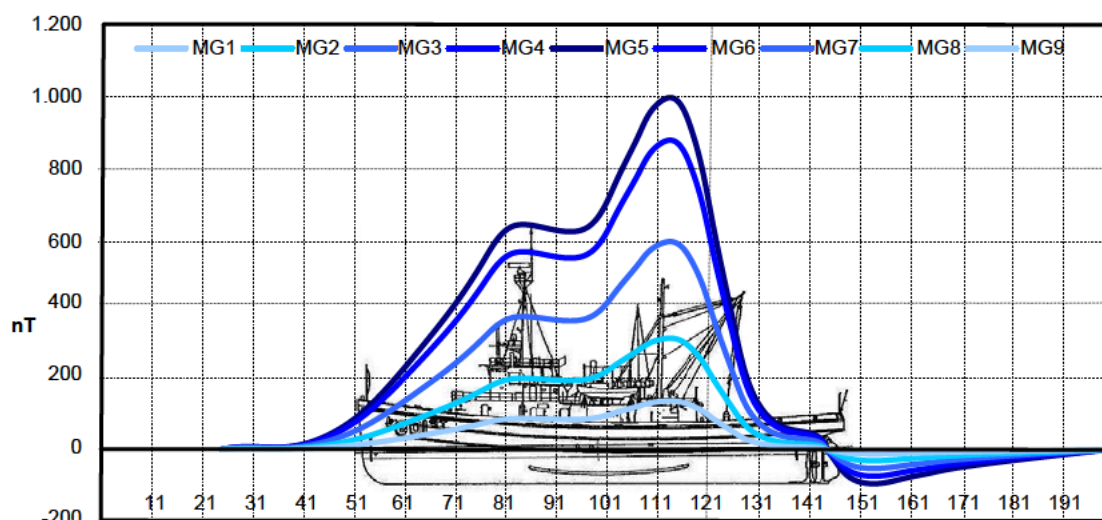


Figura 4.11. Firma magnética B_z del modelo buque a rumbo norte magnético.

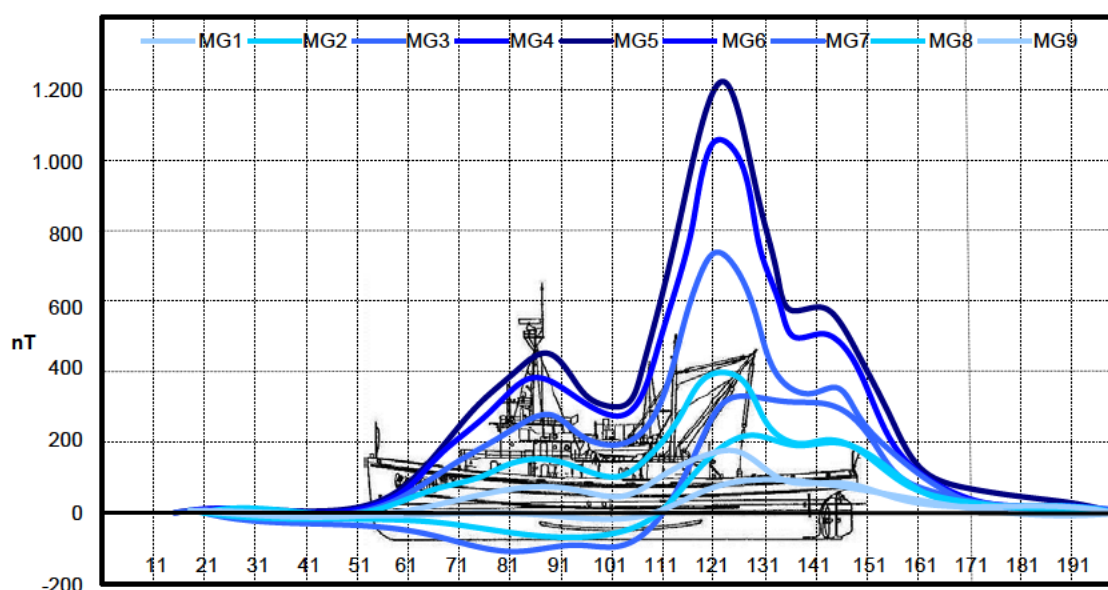


Figura 4.12. Firma magnética B_z del modelo buque a rumbo sur magnético.

Para el problema propuesto se han estudiado diferentes soluciones de compensación magnética teniendo en cuenta los tres tipos de escalado comentados (*lineal inverso*, *truncado sigma inverso* y *exponencial inverso*) con diferentes valores del parámetro de escalado y los métodos de selección *tournament* y *roulette wheel*. Para todos se ha calculado la función objetivo por el método de *Contención* ideado especialmente para este problema. Los casos estudiados son los siguientes:

- $LIRWC-1,1/1,5/2,0/2,5/3,0$: escalado *lineal inverso* para valores de la constante de escalado $c=1,1/1,5/2,0/2,5/3,0$ y método de selección *roulette wheel*. Ver figura 4.13.

- *LITC*-1,1/1,5/2,0/2,5/3,0: escalado *lineal inverso* para valores de la constante de escalado $c=1,1/1,5/2,0/2,5/3,0$ y método de selección *tournament*. Ver figura 4.14.
- *EIRWC*-0,003/0,004/0,005/0,006/0,007: escalado *exponencial inverso* para valores de la constante de escalado $K=0,003/0,004/0,005/0,006/0,007$ y método de selección *roulette wheel*. Ver figura 4.15.
- *EITC*-0,003/0,004/0,005/0,006/0,007: escalado *exponencial inverso* para valores de la constante de escalado $K=0,003/0,004/0,005/0,006/0,007$ y método de selección *tournament*. Ver figura 4.16.
- *TSIRWC*-1,1/1,5/2,0/2,5/3,0: escalado *truncado sigma inverso* para valores de la constante de escalado $C=1/1,5/2,0/2,5/3,0$ y método de selección *roulette wheel*. Ver figura 4.17.
- *TSITC*-1,1/1,5/2,0/2,5/3,0: escalado *truncado sigma inverso* para valores de la constante de escalado $C=1/1,5/2,0/2,5/3,0$ y método de selección *tournament*. Ver figura 4.18.

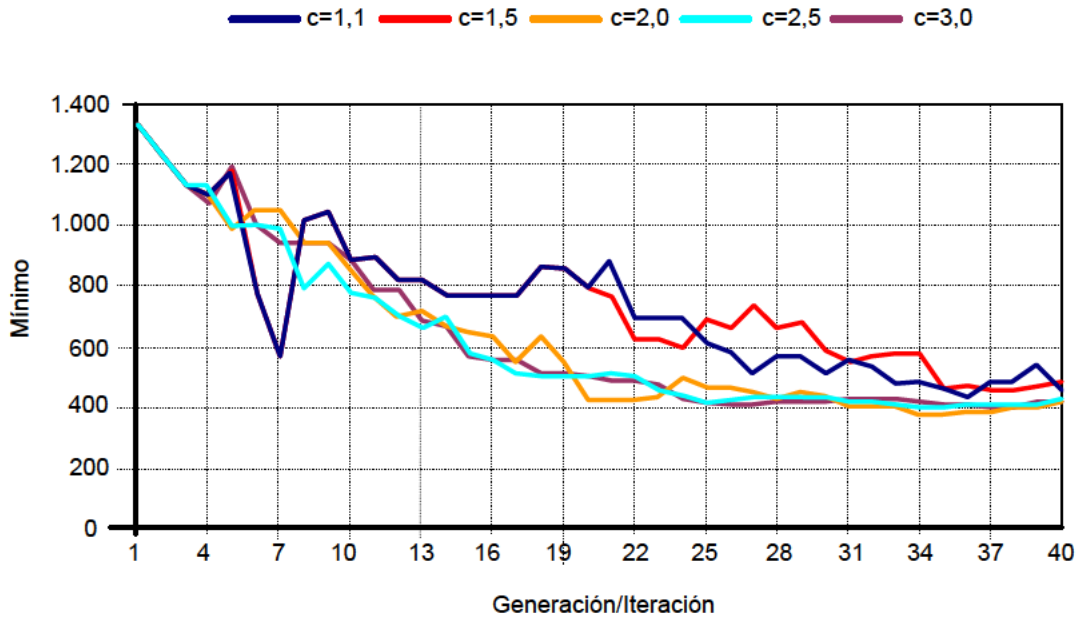


Figura 4.13. Evolución *LIRWC* para $c \in \{1,1, 1,5, 2, 2,5, 3,0\}$.

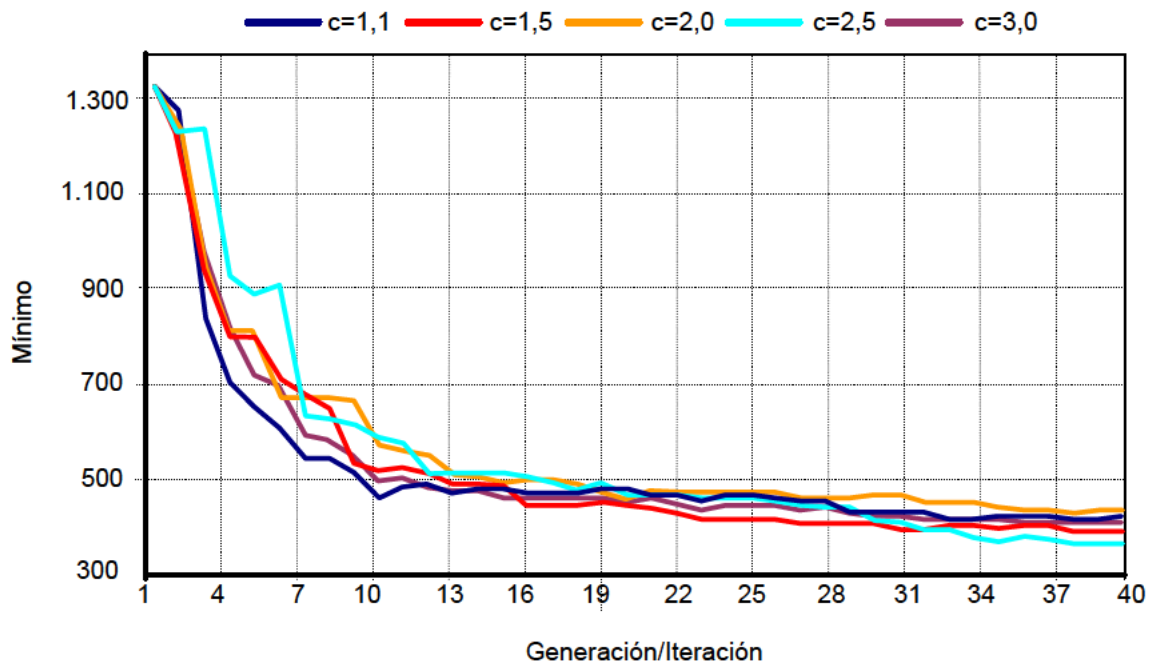


Figura 4.14. Evolución *LITC* para $c \in \{1,1, 1,5, 2, 2,5, 3\}$.

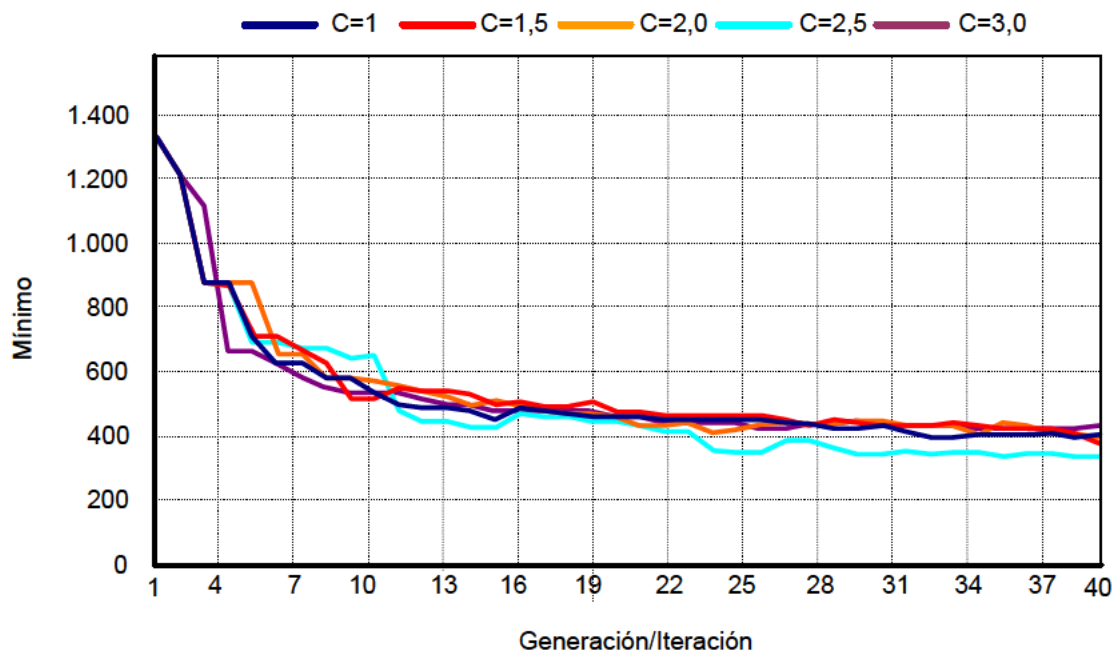


Figura 4.15. Evolución *TSIRWC* para $C \in \{1, 1,5, 2, 2,5, 3\}$.

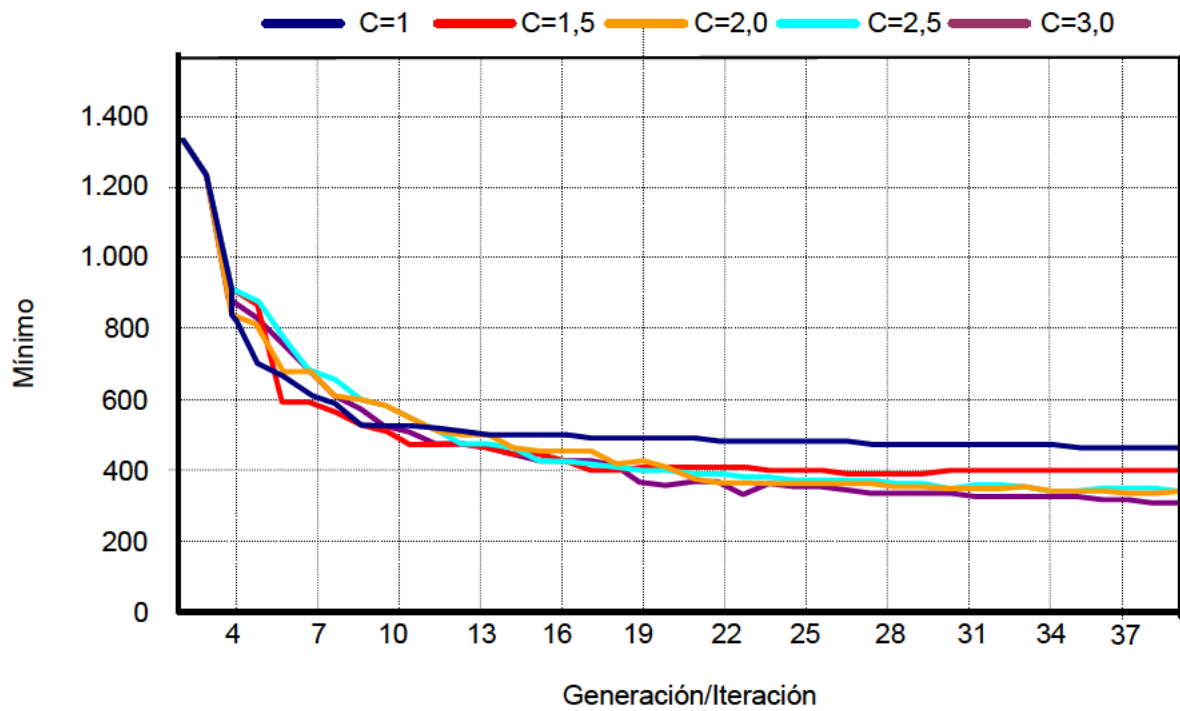


Figura 4.16. Evolución *TSITC* para $C \in \{1, 1,5, 2, 2,5, 3\}$.

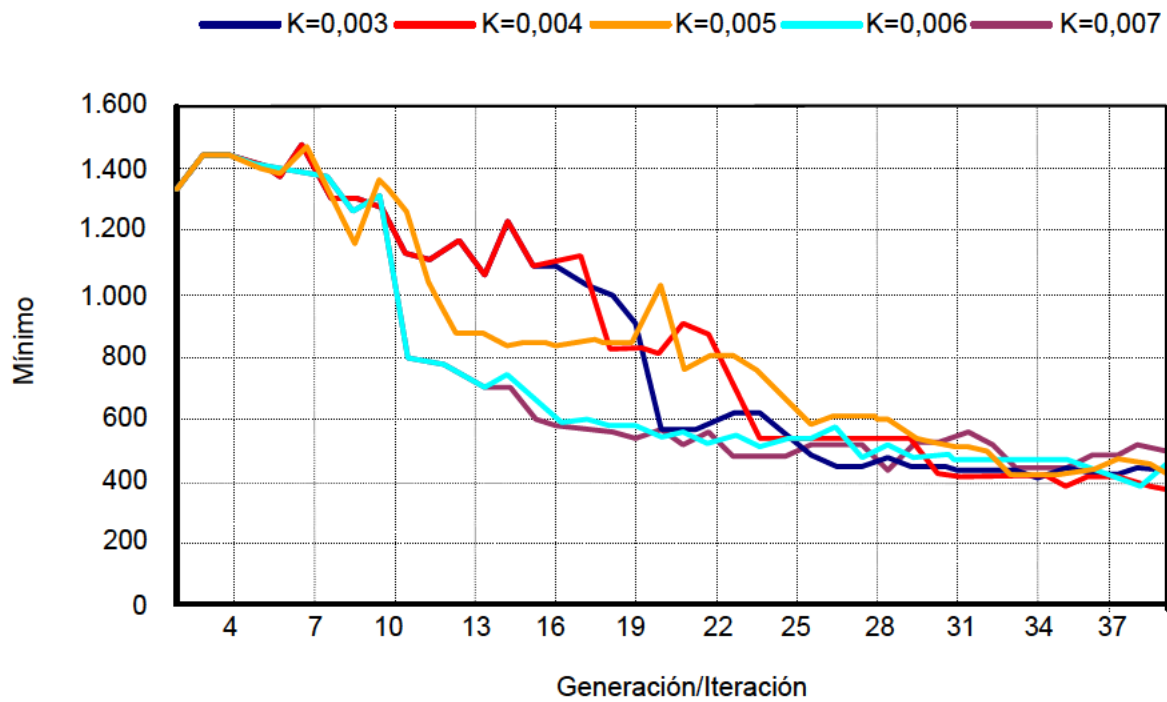


Figura 4.17. Evolución *EIRWC* para $K \in \{0,003, 0,004, 0,005, 0,006, 0,007\}$.

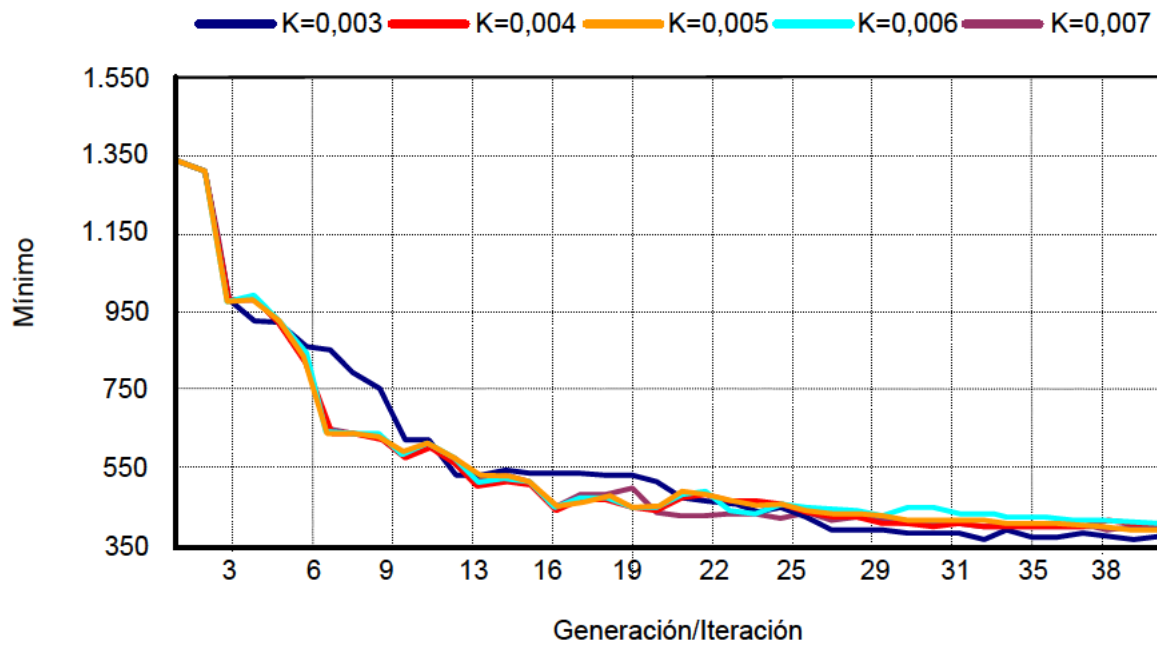


Figura 4.18. Evolución *EITC* para $K \in \{0,003, 0,004, 0,005, 0,006, 0,007\}$.

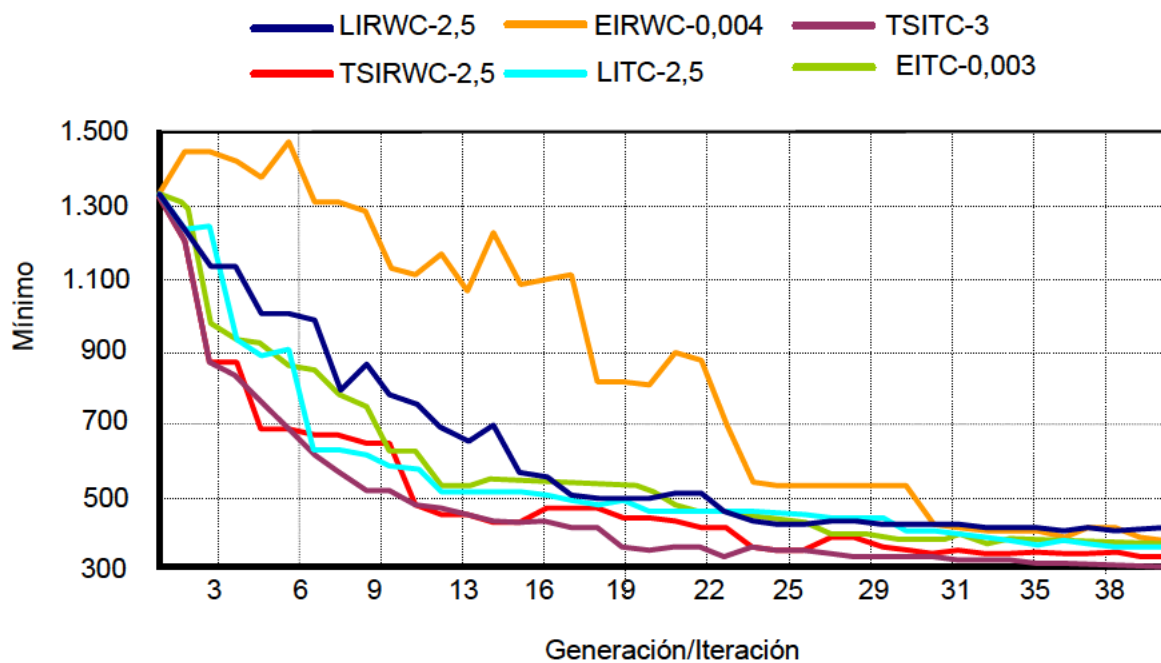


Figura 4.19. Evolución comparativa para diferentes escalados.

De todos los casos estudiados utilizando el método de Contención para el cálculo de la función objetivo buscando, el mejor ajuste de los parámetros para cada caso han sido los siguientes:

- LIRWC-2,5: escalado lineal inverso para $c=2,5$ y selección Roulette Wheel.
- LITC-2,5: escalado lineal inverso para $c=2,5$ y selección Tournament.
- EIRWC-0,004: escalado exponencial inverso para $K=0,004$ y selección Roulette Wheel.
- EITC-0,003: escalado exponencial inverso para $K=0,003$ y selección Tournament.
- TSIRWC-2,5: escalado truncado sigma inverso para $C=2,5$ y selección Roulette Wheel.
- TSITC-3: escalado truncado sigma inverso para $C=3,0$ y selección Tournament.

La figura 4.19 compara el resultado de la minimización para diferentes escalados y el mejor resultado de la constante de escalado para cada uno de ellos. El escalado *truncado sigma inverso* con el método de selección *tournament* con $C=3.0$ (TSITC-3) converge más rápido que cualquier otra técnica. La firma magnética resultante para esta configuración se muestra en la figura 4.20.

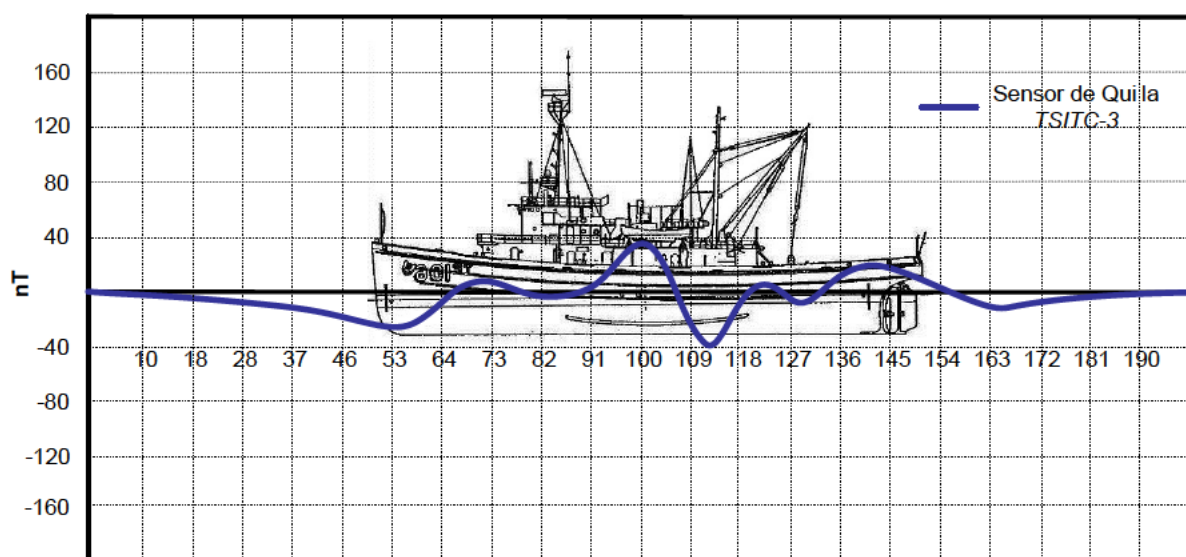


Figura 4.20. Firma de quilla para la magnetización vertical y longitudinal permanente una vez compensada por el sistema de *degaussing*.

La figura 4.21 muestra la densidad de flujo magnético inicial del buque y la compara con la densidad de flujo obtenida utilizando algoritmos genéticos con el nuevo método de *Contención* de la función objetivo. También incluye el resultado de la minimización utilizando el método de cálculo de la función objetivo de mínimos cuadrados. Se puede

observar que se ha reducido la influencia del buque en el campo magnético terrestre un 95% cuando se utiliza como función objetivo el método de *Contención* respecto del uso del método de los mínimos cuadrados (reducción del 75%).

Si comparamos la densidad de flujo magnético final con la inicial del buque (figura 4.21) se observa una reducción del nivel de pico de unas 25 veces. Se ha pasado de un valor de pico de 1.047 nT a 42 nT. Además, el algoritmo utilizado lleva a una reducción significativa del gradiente del orden del 75% respecto de la medida inicial.

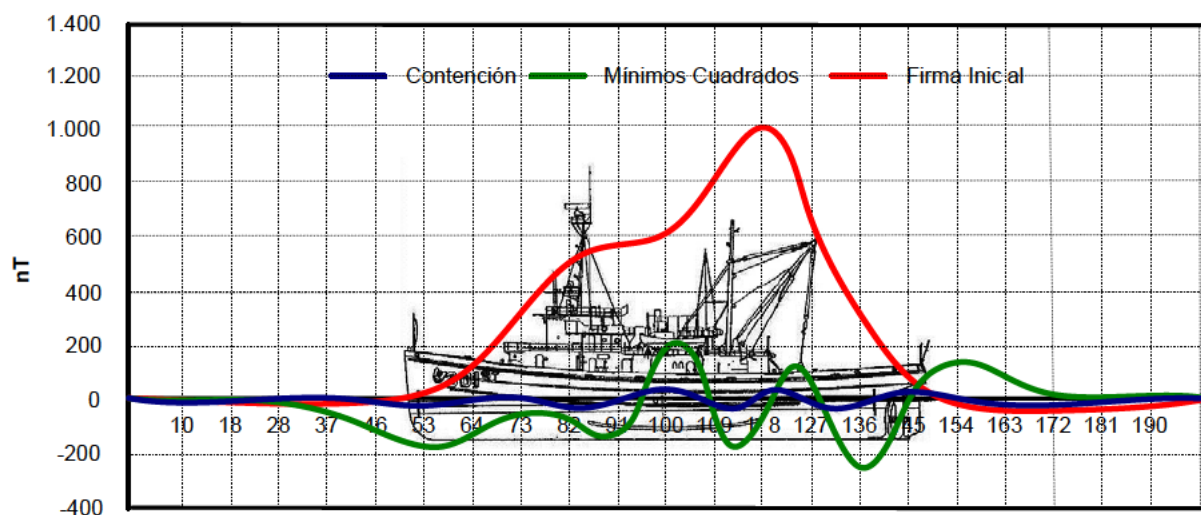


Figura 4.21. Comparación entre la medida inicial de quilla, minimización mediante *GA* usando la función objetivo de mínimos cuadrados y el método de *Contención* después de 40 generaciones.

En la figura 4.22 se muestran los gradientes inicial, después de la compensación utilizando mínimos cuadrados y después de la compensación utilizando la nueva función objetivo de *Contención*. Se observa claramente que el método de mínimos cuadrados no reduce prácticamente el gradiente, pudiendo en algunos casos ser incluso superior. La reducción del gradiente utilizando la nueva función objetivo es de un 75% respecto del original que presenta el buque (firma magnética sin compensar). Otra de las características de esta reducción a lo largo del buque es la uniformidad del rizado ya que no presenta picos que puedan representar la presencia de componentes magnéticos del buque como pueden ser los motores principales.

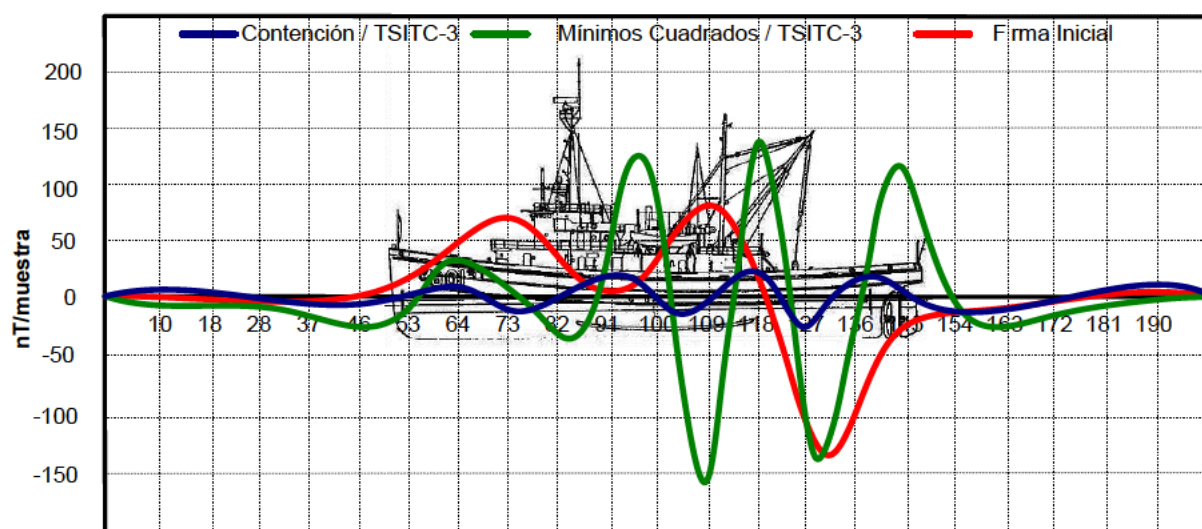


Figura 4.22. Comparación entre el gradiente del campo magnético medido en quilla para la firma inicial y los resultados de optimización mediante GA usando la función objetivo de mínimos cuadrados y contorno después de 40 generaciones.

4.5. Conclusiones

En este capítulo hemos utilizado los algoritmos genéticos para minimizar la variación del campo magnético de la tierra que un buque produce en su entorno. Se ha utilizado una novedosa función objetivo diferente a la habitual de mínimos cuadrados, a la que hemos llamado método de *Contención*. Esta nueva técnica reduce el típico rizado que aparece cuando se utilizan algoritmos de minimización. Se han probado varios mecanismos de selección y escalado con diferentes constantes siendo el más eficiente el escalado *truncado sigma inverso* y selección *tournament* con una constante $C=3,0$. Con esta novedosa técnica se ha conseguido disminuir la densidad de flujo magnético medida en más del 95% respecto al valor inicial y conduce a una reducción del gradiente de hasta un 75%.

Capítulo 5

Compensación de anomalías magnéticas locales en cubiertas de vuelo

5.1 Introducción

Los sistemas de *degaussing* pueden compensar el campo magnético que el buque produce en el entorno de su posición. Esta compensación no siempre es capaz de compensar las anomalías magnéticas locales en zonas internas al buque. A partir del presente capítulo y para un caso real en que el sistema de *degaussing* no puede compensar anomalías locales que puedan aparecer sobre las cubiertas de vuelo se va a realizar el estudio de las mismas y su compensación. Como punto de partida se va a diseñar un dispositivo simple de captura, el procedimiento de medida y el análisis de los datos y su aplicación a la cubierta de vuelo de un buque dónde se detectó la presencia de anomalías magnéticas. Este dispositivo también va a servir para validar el método y los sensores utilizados para poder elaborar posteriormente un nuevo dispositivo que automatice y simplifique el mapeado de superficies. Estas anomalías magnéticas sobre las cubiertas de vuelo de un buque pueden tener influencia en los sensores de rumbo de las aeronaves que puedan operar sobre ella y tradicionalmente son eliminadas mediante un costoso proceso de *deperming*. Este estudio se extenderá posteriormente a todos los buques la serie. El objetivo final de este trabajo es poder cuantificar las anomalías magnéticas para seleccionar aquellas que sí deben ser compensadas y proponer una nueva estrategia de minimización de las mismas que eviten someter al buque al proceso de *deperming*.

5.2 Diseño e implementación del dispositivo de captación mono-sensor de campo magnético

Se trata de disponer de un sensor triaxial montado en un soporte no magnético que permita ser orientado según los ejes de referencia magnéticos del buque. Por un lado, se necesita que dos de los ejes queden en un plano horizontal, y, por otro lado, uno de esos ejes debe tener la misma dirección que la línea de crujía de la plataforma.

Para ello se han seleccionado los siguientes componentes:

- Magnetómetro triaxial con capacidad de medir linealmente en el rango de ± 80.000 nT.
- Caja interfaz de conexiónado y alimentación.
- Trípode de aluminio y plástico con cabezal de orientación 3D (360° horizontal y $\pm 10^\circ$ vertical), con una altura mínima de 50 cm y máxima de 120 cm.
- Soporte de equilibrado horizontal y alineado del sensor.

5.2.1 Características del captor

Se han seleccionado dos tipos de magnetómetros:

1. Magnetómetro Tipo 1 (ver figura 5.1): sensor magnético triaxial para uso autónomo en sistemas sensorizados de alta sensibilidad.
 - a. Fabricante: Thomson.
 - b. Modelo: TSM 3202.
 - c. Alimentación: $\pm 12V$.
 - d. Consumo: $\pm 25mA$.
 - e. Sensibilidad magnética por eje: 4.950-5.050 mV.
 - f. Margen de medida: ± 60.000 nT.
 - g. Frecuencia de corte a 3 dB: 10Hz.



Figura 5.1. Sensor Magnético Tipo 1.

2. Magnetómetro Tipo 2 (ver figura 5.2): es un magnetómetro de laboratorio de alta sensibilidad y debe utilizarse junto con el conjunto de medida.
 - a. Fabricante: WALKER SCIENTIFIC.
 - b. Modelo: FGM-5DTAA.

- c. Alimentación: $\pm 9V$.
- d. Consumo: 550mW
- e. Margen de medida: $\pm 100.000nT$.
- f. Resolución: $\pm 1 nT$.
- g. Frecuencia de respuesta: DC a 100 Hz.



Figura 5.2. Sensor Magnético Tipo 2.

El magnetómetro Tipo 1 da el valor de la medida en voltios proporcional al fondo de escala. El magnetómetro Tipo 2 puede dar los valores a través de la pantalla directamente en nanoTeslas o a través de un puerto de salida en voltios similar al Tipo 1. El Tipo 2 es un magnetómetro de laboratorio de elevado coste y del que sólo se dispone una unidad, por lo que nos es válido para medir con el prototipo simple de captura y para calibrar por comparación el magnetómetro Tipo 1. Del magnetómetro Tipo 1 se tienen cinco unidades y va a sernos útil en el dispositivo de captura multisensor.

5.2.2 Características de la caja de conexionado y alimentación

La caja de conexiones contiene la batería formada por 10 elementos en serie de 1,2V, un interruptor general, un conector para el magnetómetro Tipo 1 y tres bornas correspondientes a las componentes X, Y y Z para medir sus valores en voltios (ver figuras 5.3 y 5.4). Los valores medidos en voltios con un Voltímetro para cada una de las componentes de transforman en nanoTeslas (nT) a razón de 12nT/mV.

El magnetómetro Tipo 2 incorpora todos los elementos mencionados por lo que no necesita caja de interconexión ni voltímetro ya que incluye una pantalla *LCD* que muestra los datos directamente en nanoTeslas.

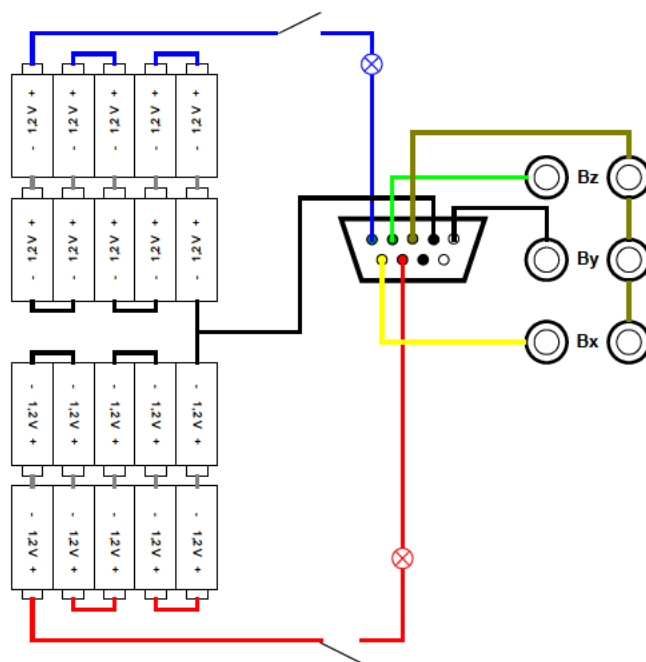


Figura 5.3. Esquema caja de conexionado sensor Tipo 1.



Figura 5.4. Caja de conexionado sensor Tipo 1.

5.2.3 Características del soporte de aluminio

El soporte de aluminio consta de un trípode de material no magnético al que se le han sustituido todos los herrajes magnéticos por otros de bronce. La posición en altura del sensor se puede variar entre 50 y 117 cm. En la parte superior incorpora un cabezal de orientación incluyendo el soporte de nivelación. La apariencia del mismo se puede ver en la figura 5.5.



Figura 5.5. Sistema de medida con magnetómetro triaxial.

5.2.4 Características del soporte de orientación.

El soporte de orientación consta de un cabezal de orientación y de un elemento de nivelación. El cabezal de orientación permite el giro de la dirección de apuntamiento del eje horizontal del magnetómetro. El elemento de nivelación permite conseguir la horizontalidad del plano XY del magnetómetro. El procedimiento para posicionar los tres ejes del sensor magnético es el siguiente:

- Utilizar los dos elementos de apuntamiento del componente de nivelación para conseguir una de las direcciones horizontales del mallado (X ó Y).
- Girar las tres ruedas separadas 120° del cabezal de orientación para conseguir la horizontalidad en los dos niveles de agua del soporte de nivelación.

Todos los elementos comentados se muestran de forma detallada en la figura 5.6.

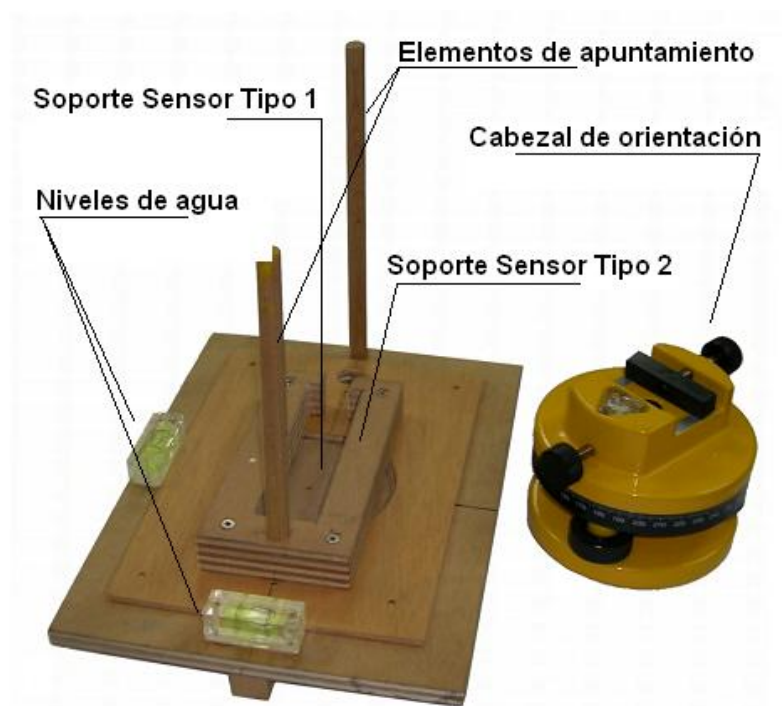


Figura 5.6. Cabezal de orientación y soporte de nivelación.

Tanto el cabezal de orientación como el soporte de nivelación están contruidos con materiales no magnéticos. En el soporte de nivelación se ha utilizado como elementos constructivos madera y tornillería no magnética. El cabezal de orientación está elaborado en aluminio y plástico, y se han tenido que sustituir diferentes elementos de unión (tornillería y arandelas) por otros similares de materiales no magnéticos.

5.3 Procedimiento de medida

En este apartado se va a establecer el procedimiento de medida para un sistema con un solo sensor triaxial, que incluye desde la preparación del equipo y la superficie a medir, hasta el análisis de datos y evaluación de los mismos. Para ello se ha hecho necesaria la definición de todos los parámetros que permitan dar un valor cuantitativo del mapa magnético resultante. El valor de los parámetros obtenidos será nuestro punto de partida para el estudio global de todas las Plataformas medidas. La medida de los mapas magnéticos suelen hacerse en puerto con el buque atracado o en la mar, en estado de mar llana o en calma al rumbo determinado.

El procedimiento de medida para el levantamiento de mapas magnéticos es el siguiente:

- Preparación del equipo de medida: se comprueba que todos los elementos estén operativos aplicando un campo magnético conocido a los magnetómetros (bobinas de calibración) y validando el valor en sus tres componentes.
- Marcado de la superficie a medir (puntos a medir): se marcará con una tiza u otro sistema de marcado no permanente, la malla de puntos sobre los que se realizará la medida.

- Establecer el Sistema de Referencia del Equipo de Medida en consonancia con las magnetizaciones de la Plataforma: los tres ejes del magnetómetro se orientarán según las magnetizaciones de la Plataforma (figura 5.7).
- Situar el equipo de medida sobre cada uno de los puntos: se situará físicamente el centro del trípode (sensor magnético) sobre el punto marcado a la distancia de medida.
- Orientar el cabezal en la dirección popa-proa: se realizará mediante los elementos de apuntamiento del soporte de nivelación.
- Nivelar el plano: para ello se utilizarán las tres ruletas del cabezal de orientación teniendo en cuenta los niveles de agua del soporte de orientación.
- Tomar medida en los tres ejes: se medirán con un voltímetro los valores en voltios de cada una de las componentes magnéticas del sensor Tipo 1. El magnetómetro Tipo 2 se ha utilizado para comprobar las medidas tomadas por el Tipo 1 en varios de los puntos.

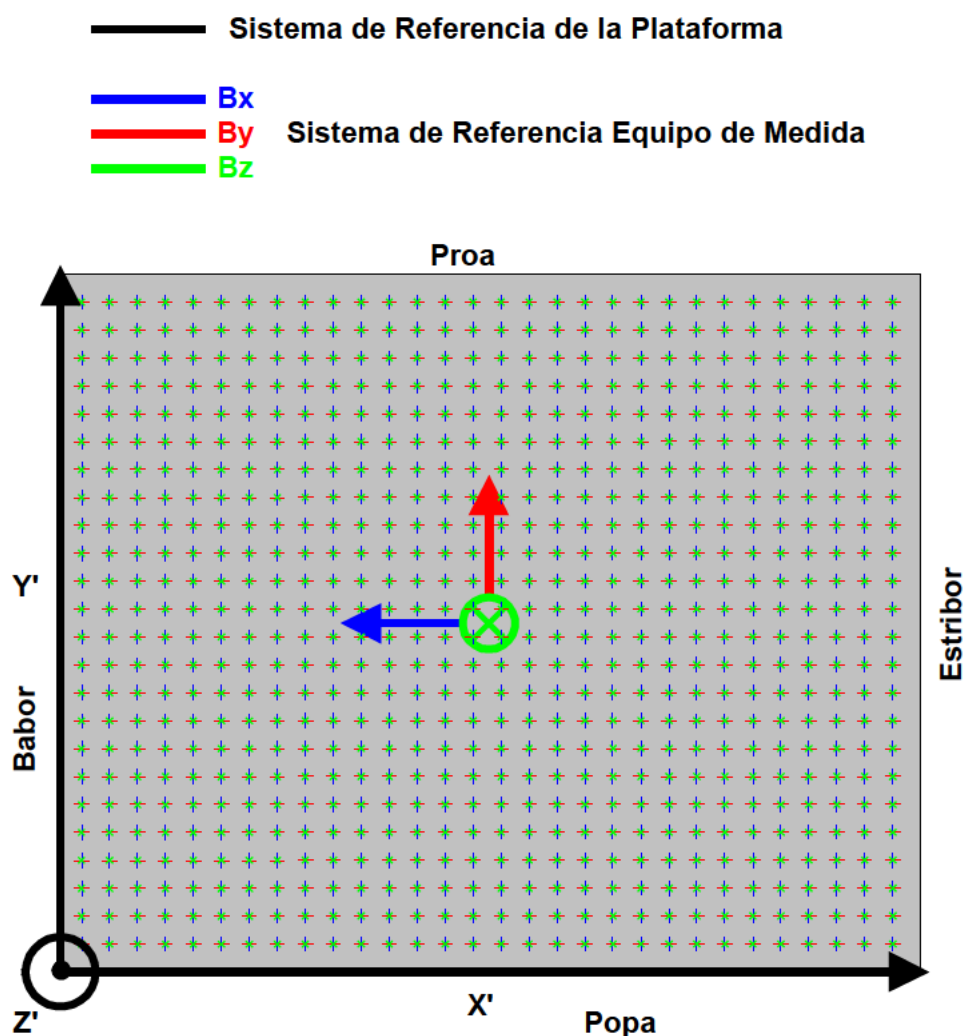


Figura 5.7. Sistemas de referencia de medida y de la plataforma.

- Restar al campo medido el campo magnético terrestre en la zona.
- Convertir los valores medidos al sistema de referencia de la plataforma. En la figura 5.7 se pueden ver las diferentes orientaciones del equipo de medida y de la plataforma. Ambos están relacionados con la disposición física del sensor sobre el conjunto de medida y el modelo magnético del buque.
- Convertir los valores en voltios a nanoTeslas en el caso del sensor Tipo 1: se tomarán los valores medidos y se corregirán por los valores máximos y mínimos de la escala en nanoTeslas.

5.4 Levantamiento del mapa magnético de la plataforma *P1*

Para validar el dispositivo de medida de campo magnético se va a aplicar a la medida de la cubierta de vuelo del primer buque bajo estudio (que llamaremos Plataforma *P1*).

Esta plataforma tiene las siguientes características:

- Descripción: Zona de aterrizaje de helicópteros.
- Dimensiones: 14,5 x 11,5 m².
- Distancia de la medida: 1 metro.
- Mallado: 0,5 m x 0,5 m (30 columnas x 24 filas).
- Orientación: 330° geográficos. La orientación del helicóptero sobre la cubierta es con la proa apuntando al rumbo comentado.
- Material constructivo: acero naval.

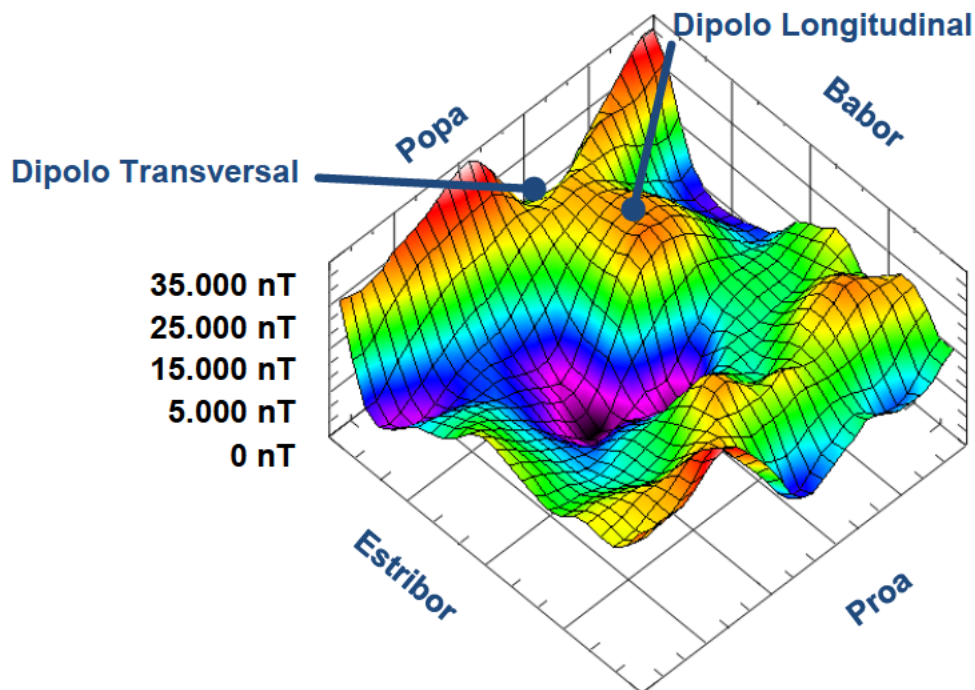


Figura 5.8. Componente Longitudinal Campo Magnético Plataforma *P1*.

En este apartado se mostrarán los mapas elaborados en una vista tridimensional y se realizará una estimación del tipo de dipolos que podrían ser los causantes de la anomalía magnética en la zona donde aparecen. Se puede entender que los dipolos verticales, longitudinales o transversales son capaces de compensar esa variación de campo; dichos dipolos pueden ser bobinas específicamente diseñadas para que produzcan el efecto compensatorio en el área de influencia diferente a las de *degaussing*.

La figura 5.8 muestra la componente longitudinal del campo magnético medido. Se aprecian dos dipolos, uno longitudinal, y otro, transversal, ambos de pequeña magnitud. El dipolo transversal está en la zona central, entre babor y estribor, cerca de la popa. La característica fundamental de la componente longitudinal del dipolo transversal es una zona de campo nulo dónde está situado dos zonas opuestas que presentan un máximo y un mínimo en sentido babor-estribor (función impar). El dipolo longitudinal tiene la forma de función par en esta componente y está superpuesto al dipolo transversal.

Como consecuencia de esto esta superficie presenta una anomalía que va a producir una pequeña desviación del rumbo del instrumento de vuelo que cuantificaremos en el capítulo 7. Hay que tener en cuenta que existe una magnetización inducida que debe ser responsable de parte del momento dipolar del dipolo longitudinal ya que la orientación del buque es casi norte y la componente transversal inducida es despreciable.

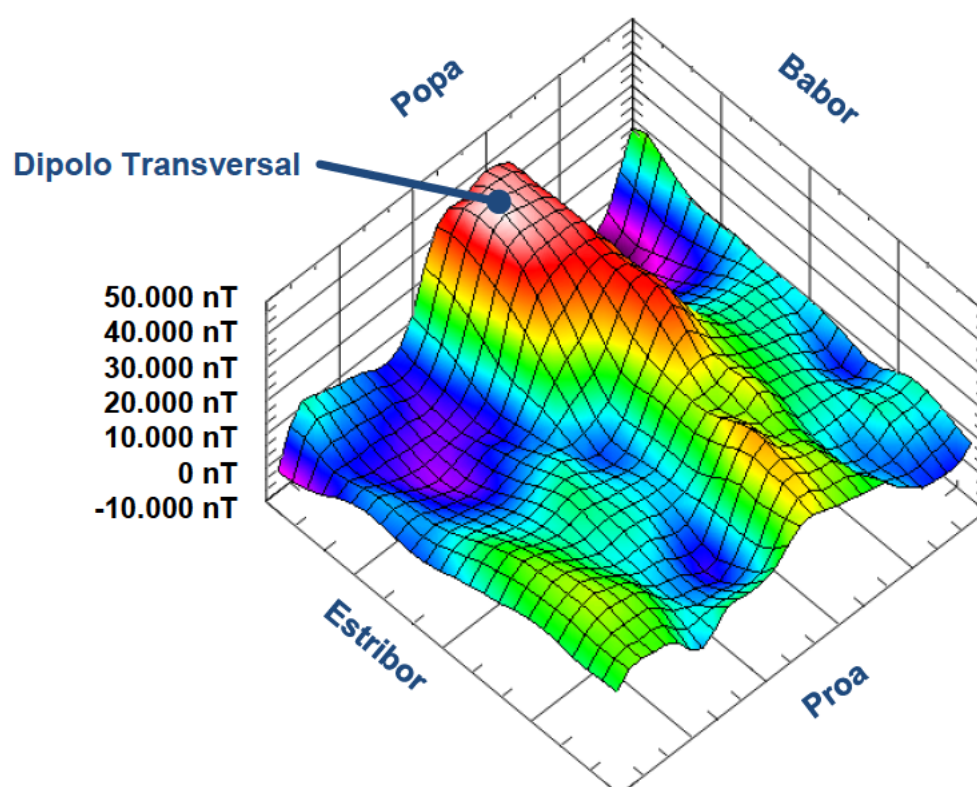


Figura 5.9. Componente transversal magnético plataforma P1.

En la figura 5.9 se muestra la componente transversal del campo magnético de la superficie de la Plataforma *P1*. Como puede observarse existe un dipolo transversal muy importante en la zona de popa aproximadamente en el punto medio entre babor y estribor (zona de crujía). Como se comentó anteriormente al estar el buque orientado al norte geográfico la componente inducida transversal es mínima por lo que todo el dipolo magnético transversal detectado corresponde a un dipolo permanente. Este dipolo es con seguridad el causante de la anomalía de rumbo magnético sobre la superficie de la cubierta de vuelo de este buque.

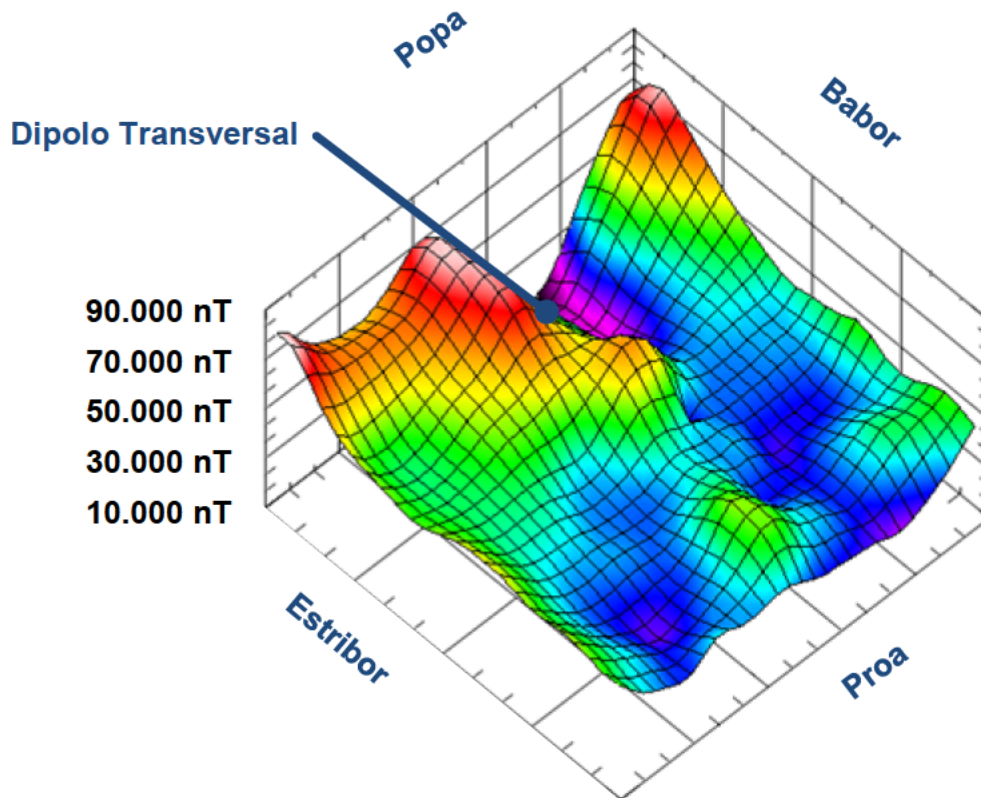


Figura 5.10. Componente vertical magnética de la plataforma *P1*.

La componente vertical del campo magnético de la plataforma *P1* se muestra en la figura 5.10. En ella predomina claramente un dipolo magnético transversal en la zona de popa. Las tres componentes del campo magnético medidas presentan un dipolo transversal que es el causante del error de rumbo que puede presentar cualquier instrumento de navegación en esa zona del buque.

Una vez que se tienen los valores de las tres componentes magnéticas se pueden utilizar las componentes *X* e *Y* para calcular el error de rumbo magnético para todos los puntos medidos a un metro de la cubierta de vuelo de la Plataforma *P1*. De esta manera podemos calcular el error que mediría un sensor magnético de rumbo en dicha zona de la cubierta. Para el cálculo del error de rumbo magnético se ha utilizado la expresión (5.1).

$$E_{\text{Rumbo}} = 180 \cdot \arctg(X/Y) / \pi + 360^\circ - (R_{\text{Geográfico}} - D_{\text{Magnética}}) \quad (5.1)$$

Dónde X se corresponde con los valores de la componente X ó Transversal medida por el magnetómetro triaxial. La componente Y es la componente longitudinal del campo magnético. Esta Plataforma estaba el día de las medidas en las coordenadas geográficas $43^{\circ} 28' 34,13''$ N y $8^{\circ} 14' 25,49''$ O, a un rumbo geográfico de 330° (*RGeográfico*) y una declinación magnética (*DMagnética*) de $-4,43^{\circ}$ (Oeste) [25].

En la figura 5.11 está representada el mapa del error de rumbo magnético elaborado a partir de los datos de campo magnético de los ejes X e Y (transversal y longitudinal). Puede apreciarse una vasta zona con un valor del rumbo significativamente diferente al real del buque (-30°). Dicha zona coincide con la situación del dipolo transversal detectado en los mapas de cada una de las componentes magnéticas.

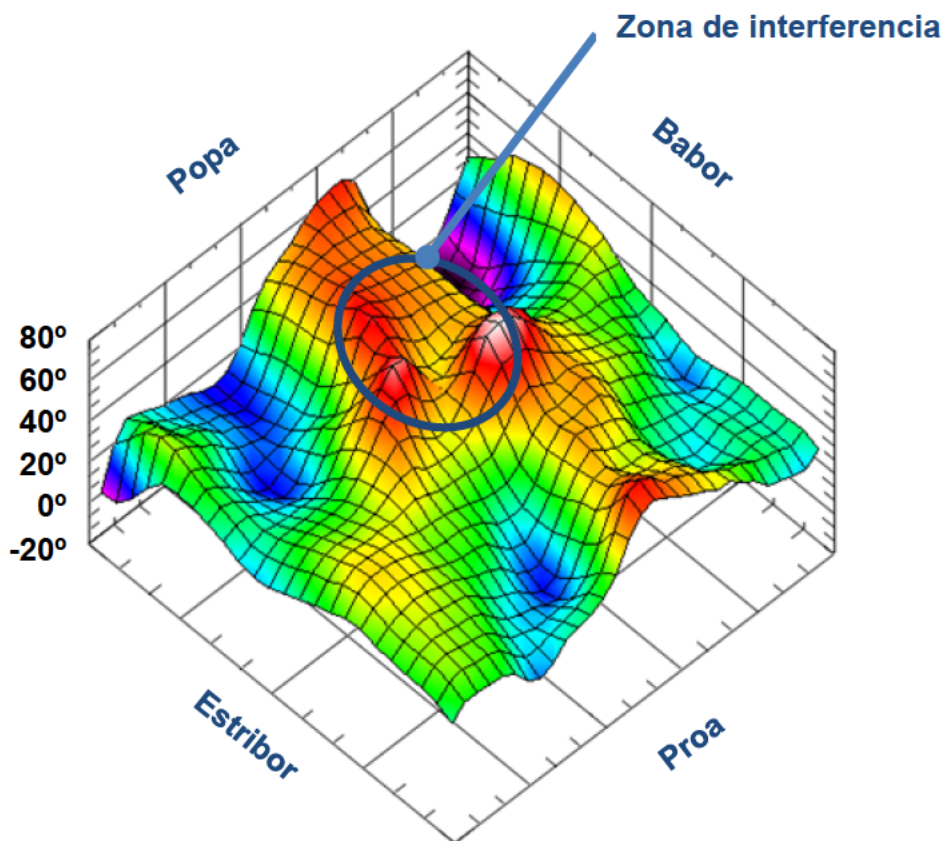


Figura 5.11. Error de rumbo de la plataforma *P1* a 1 metro de la superficie.

5.5 Evaluación de resultados

Una vez realizada una primera valoración cualitativa de los resultados obtenidos se van a analizar las curvas definiendo una serie de parámetros y procedimientos que nos permitan cuantificarlos y posteriormente compararlos con otras medidas similares realizadas a otras plataformas dedicadas al mismo uso. Estos parámetros se van a evaluar para cuatro zonas dentro del área de medida. Estas zonas se caracterizan por la presencia o no de efecto borde y por la situación de la zona de influencia sobre los sensores de rumbo. El efecto borde está relacionado con la cercanía de los puntos muestreados a las bandas de babor y estribor y a popa, dónde existe una discontinuidad de la superficie ferromagnética. En la figura 5.12 pueden verse las cuatro zonas comentadas. Son las siguientes:

- Zona Z1: comprende todos los puntos medidos (720 puntos) de la Plataforma, es decir, el área delimitada por los puntos (1,1), (30,1), (30,24) y (1,24). Los valores que se extraigan para esta zona dan una idea del estado magnético de la cubierta de vuelo. Hay que tener en cuenta que se incluye el efecto del borde de la cubierta debido a las bandas de babor y estribor y la zona de popa.
- Zona Z2: comprende 270 puntos y su área está delimitada por los puntos (1,4), (30,4), (30,12) y (1,12). Es la zona de influencia de la magnetización transversal causante de la anomalía magnética local.
- Zona Z3: está definida por el área comprendida entre los puntos (8,4), (23,4), (23,12) y (8,12) y abarca 139 puntos de medida. Es la Zona 2 sin tener en cuenta el efecto borde por lo que no llega a las bandas de babor y estribor de la superficie.
- Zona Z4: comprende una única línea de 15 puntos entre (8,8) y (23,8). Está centrada en la fila dónde el sensor magnético está situado cuando el helicóptero está en posición de despegue.

Para visualizar con precisión la situación de las magnetizaciones dentro del mallado de datos magnéticos muestreados y las cuatro zonas (Z1, Z2, Z3 y Z4) sobre las que se van a evaluar las magnetizaciones se muestran en las figuras 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16 las gráficas de las componentes magnéticas y del error de rumbo en gradiente de colores en dos dimensiones.

Los tres primeros parámetros que se van a evaluar son el máximo (VMAX), el mínimo (VMIN) y promedio (VPRO) de la inducción magnética medida en nanoTeslas. Sus valores se calcularán según las ecuaciones (5.2), (5.3) y (5.4), respectivamente.

$$V \max = \max_{\rightarrow H, \theta} (B_{P(i,j)}(x, y, z)) \forall i, j \in Z_n \quad (5.2)$$

$$V \min = \min_{\rightarrow H, \theta} (B_{P(i,j)}(x, y, z)) \forall i, j \in Z_n \quad (5.3)$$

$$V_{pro} = \frac{1}{s \times t} \sum_{i=Z_n(1,j)}^{Z_n(s,j)} \sum_{j=Z_n(i,1)}^{Z_n(i,t)} (B_{P(i,j)}(x, y, z)) \forall i, j \in Z_n \quad (5.4)$$

Dónde, $B_{P(i,j)}(x, y, z)$ es la inducción magnética de un punto $P(i,j)$ de la Plataforma en una zona de la Tierra H a un rumbo θ . Z_n es la zona de la Plataforma dónde se evalúan cada

uno de los parámetros dentro del mapa magnético completo de dimensiones “ $s \times t$ ” (filas x columnas).

El error de rumbo (VAE) para todos los puntos del mallado de cada zona se calcula según la ecuación (5.5).

$$V_{AE}(i, j) = 180^\circ \times \frac{\arctg\left(\frac{\vec{B}_{P(i,j)}(x)}{\vec{B}_{P(i,j)}(y)}\right)}{\pi} + 360^\circ - (RGeo - Dec) \forall i, j \in Z_i \quad (5.5)$$

Dónde, $\vec{B}_{P(i,j)}(x)$ y $\vec{B}_{P(i,j)}(y)$ son las componentes X (Transversal) e Y (Longitudinal), respectivamente, de la inducción magnética de un punto $P(i, j)$ de la plataforma en una zona de la Tierra H a un rumbo θ . $RGeo$ es el rumbo geográfico y Dec es la declinación magnética.

Los tres parámetros que se utilizarán para la evaluación del error de rumbo (VAE) en las cuatro zonas definidas son el máximo (VAE_{Max}), el mínimo (VAE_{min}) y el promedio ($PVAE$). Sus valores se calcularán según las ecuaciones (5.6), (5.7) y (5.8), respectivamente.

$$V_{AE} \max = \max(V_{AE}(i, j)) \forall i, j \in Z_n \quad (5.6)$$

$$V_{AE} \min = \min(V_{AE}(i, j)) \forall i, j \in Z_n \quad (5.7)$$

$$PVAE = \frac{1}{s \times t} \sum_{i=Z_n(1,j)}^{Z_n(s,j)} \sum_{j=Z_n(i,1)}^{Z_n(i,t)} V_{AE}(i, j) \forall i, j \in Z_n \quad (5.8)$$

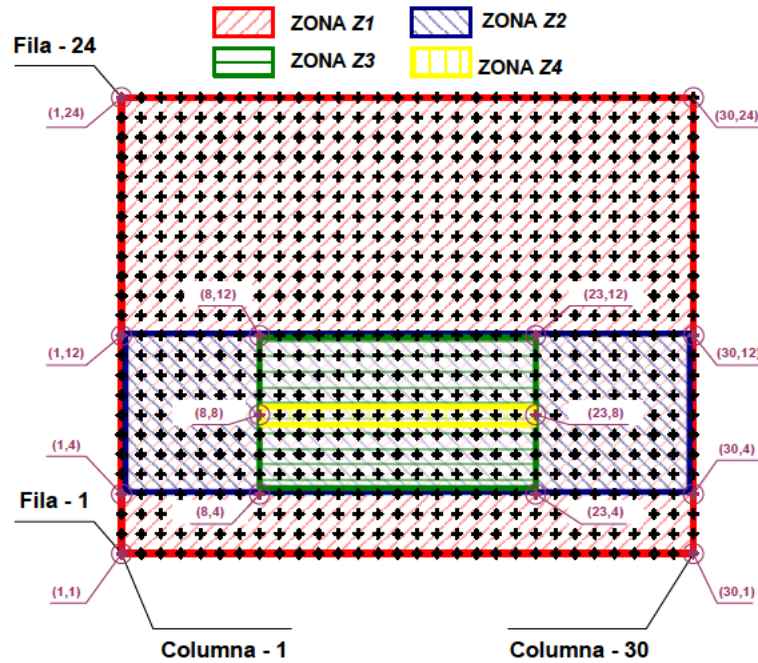


Figura 5.12. Zonas de evaluación dentro de la superficie muestreada.

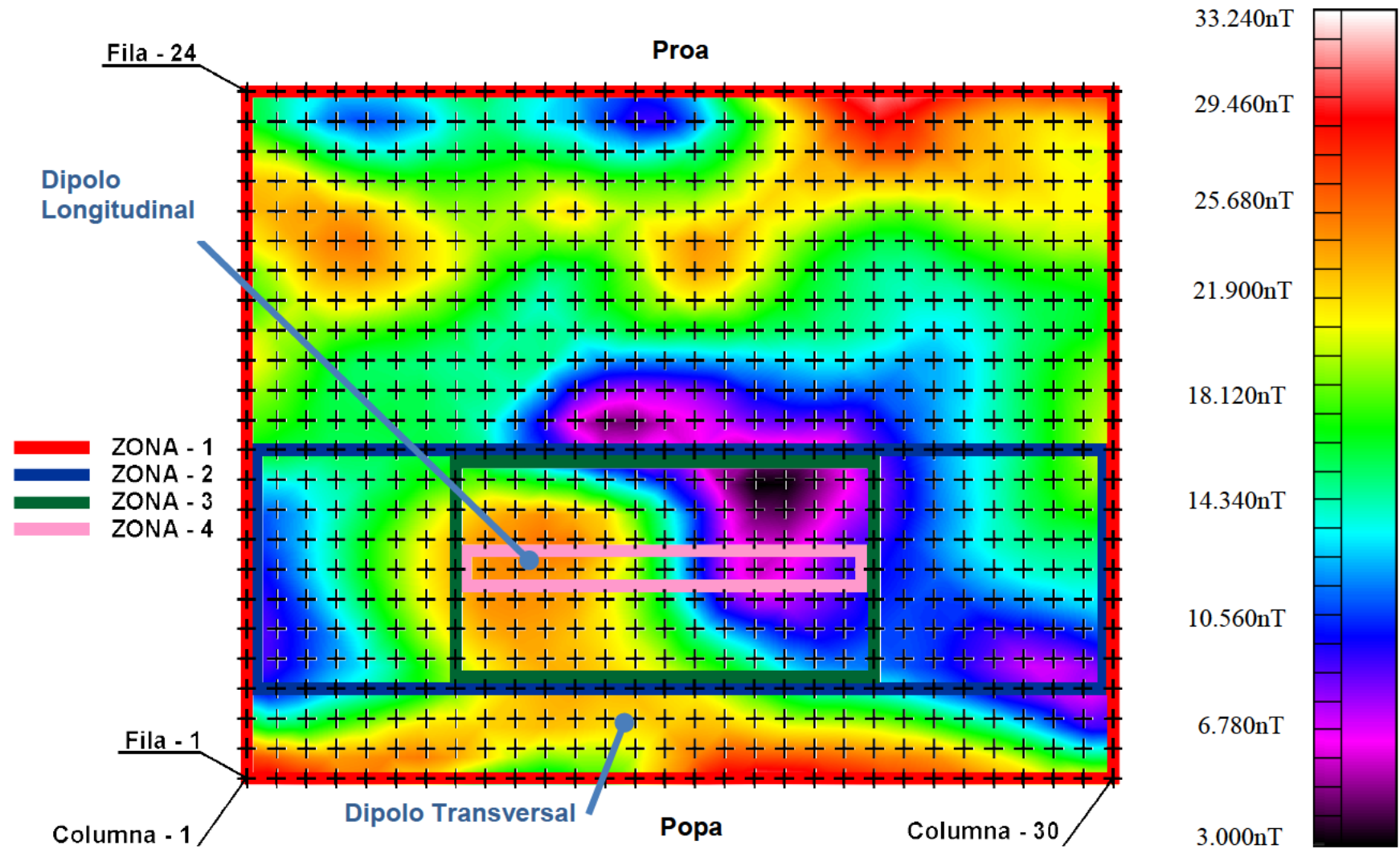


Figura 5.13. Zonas de estudio de la componente magnética longitudinal a 1 metro de la superficie de la Plataforma *P1*.

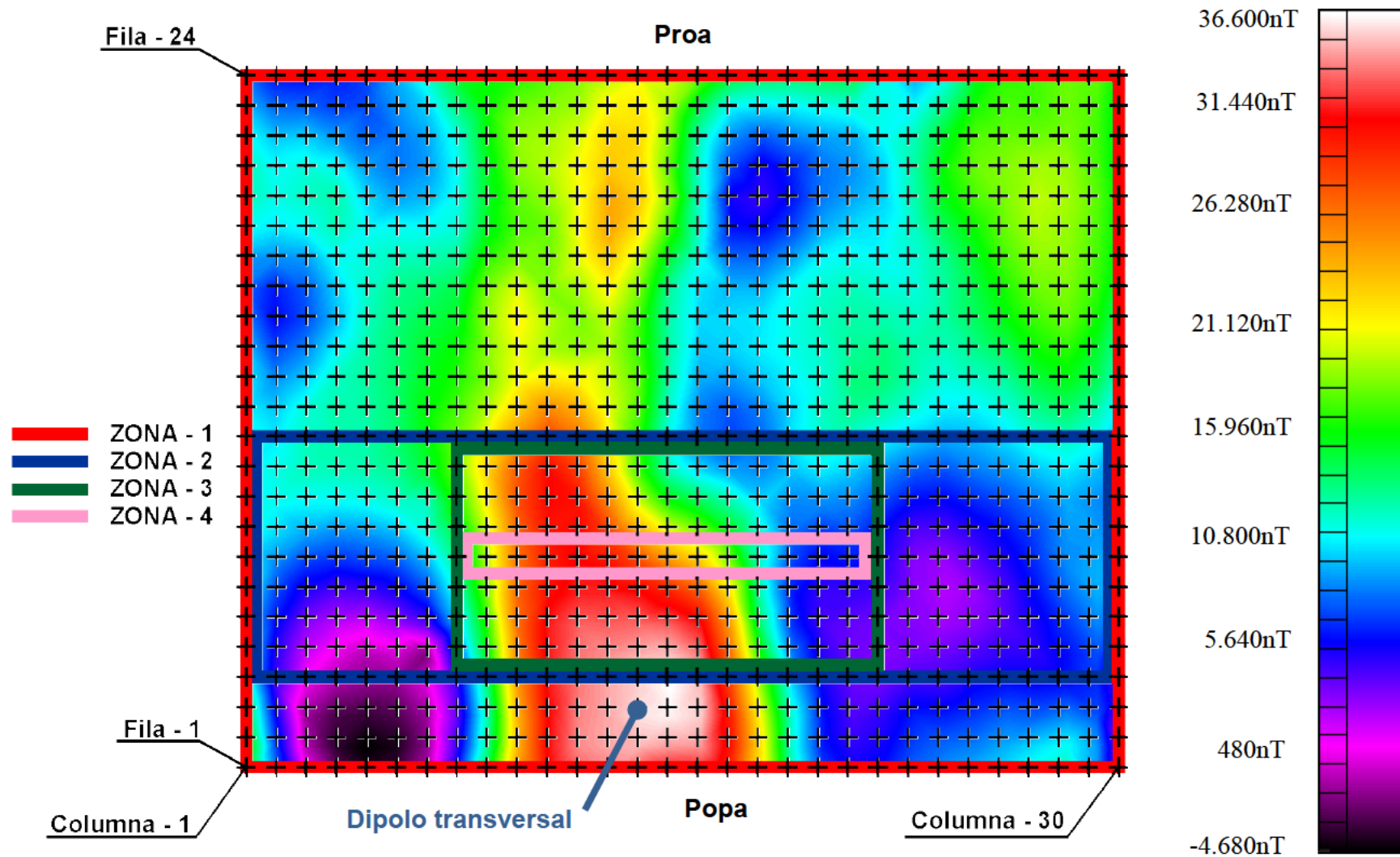


Figura 5.14. Zonas de estudio de la componente magnética transversal a 1 metro de la superficie de la Plataforma P1.

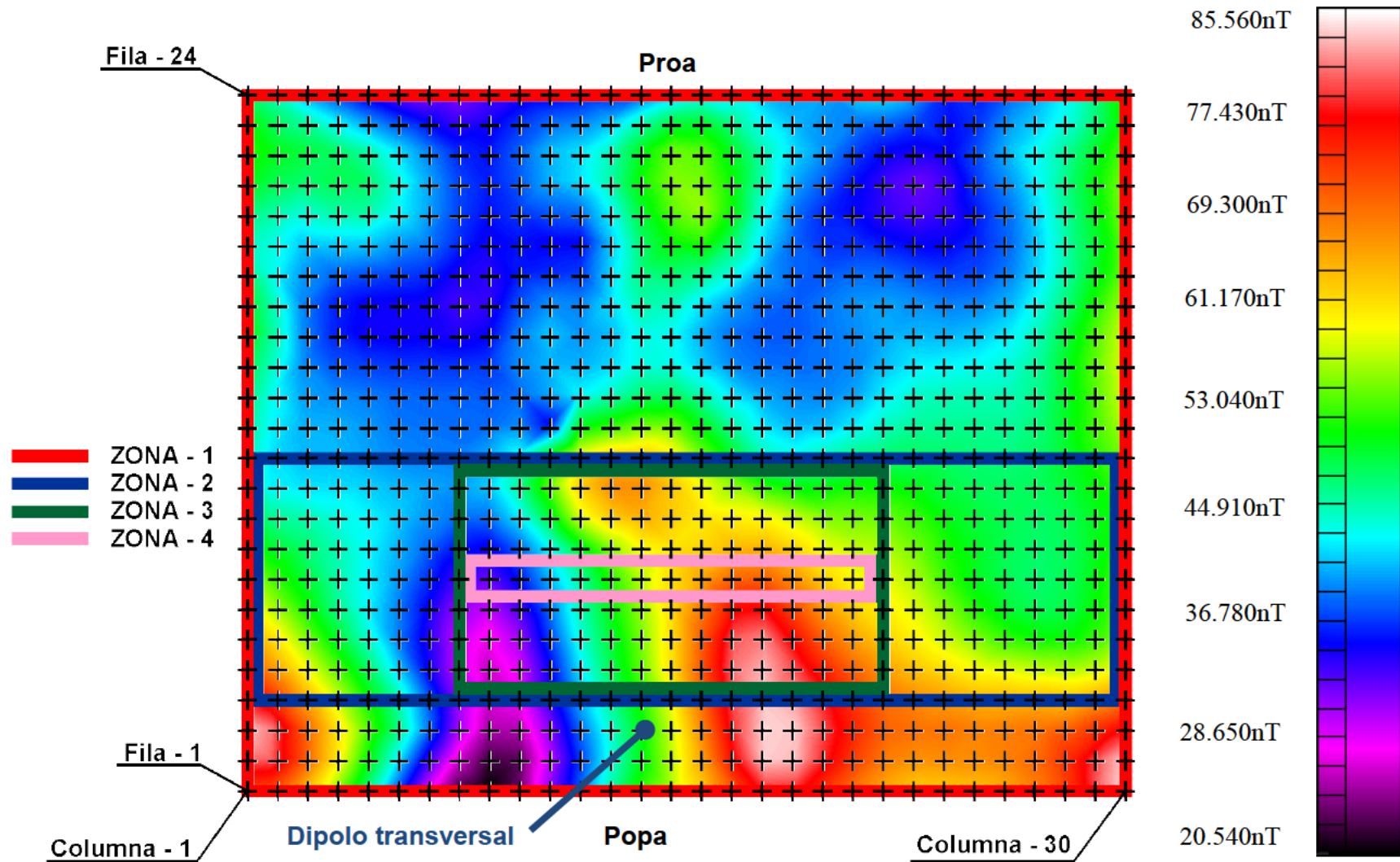


Figura 5.15. Zonas de estudio de la componente magnética vertical a 1 metro de la superficie de la Plataforma P1.

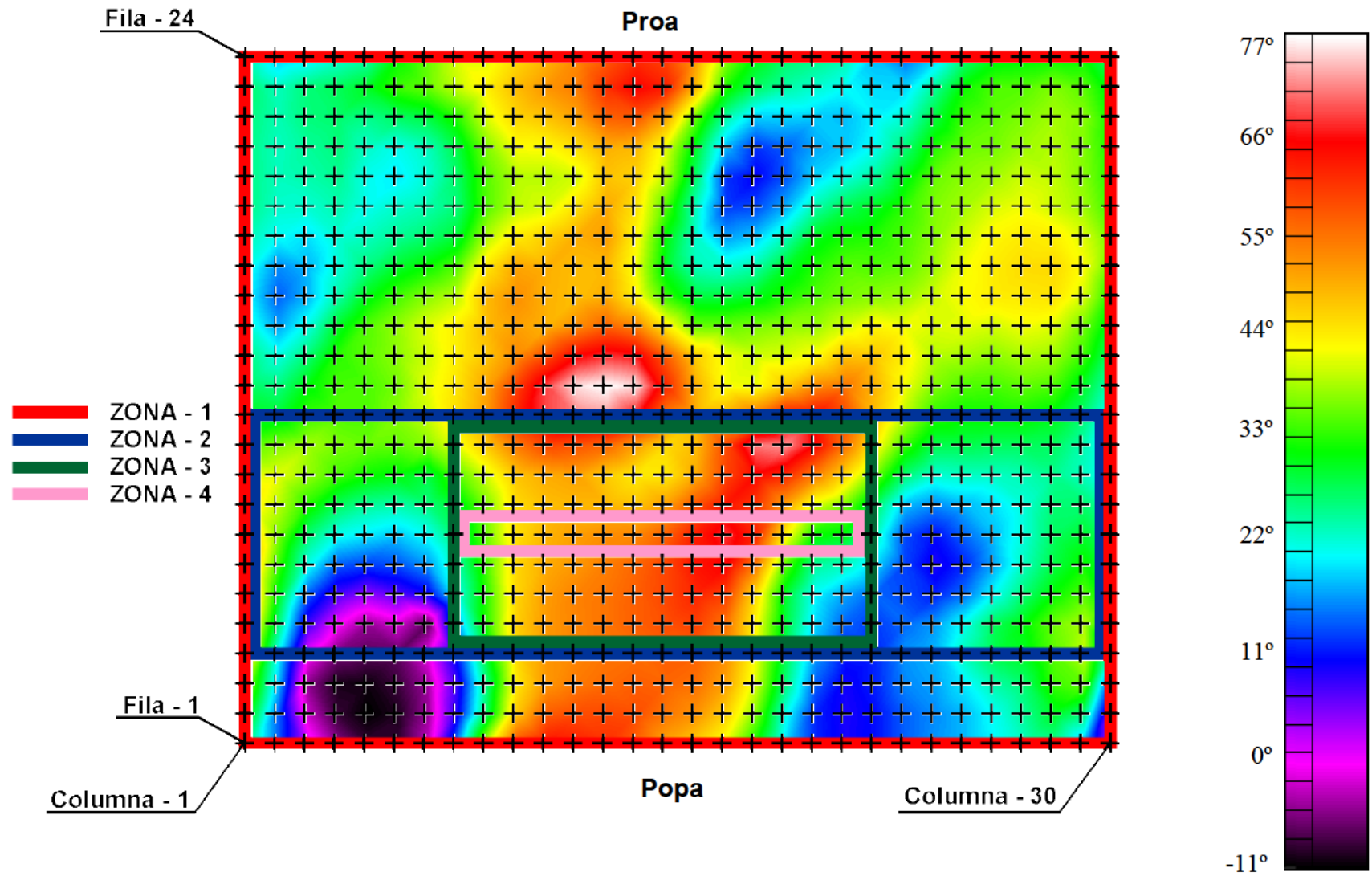


Figura 5.16. Zonas de estudio del error de rumbo magnético a 1 metro de la superficie de la Plataforma P1.

Los valores de V_{MAX} (ecuación (5.2)), V_{MIN} (ecuación (5.3)), V_{PRO} (ecuación (5.4)), VAE_{Max} (ecuación (5.6)), VAE_{Min} (ecuación (5.7)) y $PVAE$ (ecuación (5.8)) de cada una de las zonas se muestran en las tablas 5.1 y 5.2.

Tabla 5.1. Valores máximo, mínimo y promedio de la inducción magnética en nanoTeslas.

Componente	Zona	V_{MAX}	V_{MIN}	V_{PRO}
X	1	36.600	-4.680	13.385
	2	36.600	-2.040	12.894
	3	36.600	2.880	18.266
	4	31.560	2.880	17.556
Y	1	33.240	3.000	17.715
	2	26.160	3.000	14.964
	3	26.160	3.000	15.603
	4	25.200	6.000	15.900
Z	1	85.560	20.520	50.103
	2	83.640	27.000	54.422
	3	83.640	27.000	56.141
	4	70.680	33.840	55.680

Tabla 5.2. Valores máximo, mínimo y promedio del error de rumbo en grados.

Zona	VAE_{Max}	VAE_{Min}	$PVAE$
1	77°	-11°	36°
2	77°	-7°	38°
3	77°	12°	47°
4	68°	14°	45°

En esta plataforma se conoce que existe una anomalía magnética importante por la información que existe de los problemas operacionales de los helicópteros sobre la cubierta de vuelo. De las cuatro zonas definidas se pretende seleccionar aquella que mejor represente a la anomalía magnética según los valores de las tablas 5.1 y 5.2. Teniendo en cuenta el efecto borde que se puede presentar en las zonas $Z1$ y $Z2$ no se deben tener en cuenta los valores para las componentes X y Z de la zona $Z1$. Al descartar la zona $Z1$, la zona $Z3$ es la más representativa de la anomalía (valores más altos de V_{MAX} y V_{PRO} y valores más pequeños de V_{MIN}). Esta decisión de elegir la zona $Z3$ como zona en la que se debe centrar nuestro estudio se apoya también en el parámetro $PVAE$ donde claramente supera el promedio del error de rumbo al habido en las zonas $Z1$ y $Z2$. La zona $Z4$ aunque tiene un valor $PVAE$ cercano al de la zona $Z3$ representa el habido en una sola línea (fila) y no abarca todas las posiciones posibles de los sensores magnéticos del helicóptero.

Los valores de magnitud de campo magnético de cada una de las componentes no indican de forma clara la variación de ésta a lo largo de la cubierta de vuelo. La existencia de una magnetización permanente longitudinal o transversal importante localizada en un área reducida de la cubierta se manifiesta en una variación de cambio de signo respecto de la media en una columna (Popa-Proa) o una fila (Babor-Estribor), respectivamente. Por ello, se va a introducir nuevos parámetros que den una idea global de las variaciones de campo entre los máximos y los mínimos locales:

- Gradiente extendido por filas (*GEPF*): se realiza el promediado de todas las filas de la zona seleccionada del mapa magnético (5.9) para cada una de las componentes. Se calcula el máximo y mínimo de la curva resultante. La diferencia entre ellos se divide por la distancia en metros para obtener la variación en nanoTeslas por metro (nT/m) y se obtiene *GEPF*(*X*, *Y*, *Z*) (ecuación (5.10)). Por ello, se establecen tres parámetros para los ejes *X*, *Y* y *Z*, que se denominarán *GEPF_X* (5.11), *GEPF_Y* (5.12) y *GEPF_Z* (5.13), respectivamente. Esta operación, en procesamiento de señal, se corresponde con el integrador simple, que es un filtro *FIR* cuya respuesta en frecuencia es paso bajo; el número de muestras coincide con el orden del filtro.

$$PF(i, x, y, z) = \frac{1}{t} \sum_{j=Z_n(i,1)}^{Z_n(i,t)} \left(B_{P(i,j)}^{\rightarrow H, \theta}(x, y, z) \right) \Bigg|_{i,j \in Z_n} = \left. B_{P(i)}^{\rightarrow H, \theta}(x, y, z) \right|_{i \in Z_n} \quad (5.9)$$

Dónde, $B_{P(i,j)}^{\rightarrow H, \theta}(x, y, z)$ es la inducción magnética de un punto $P(i,j)$ de la Plataforma en una zona de la Tierra H a un rumbo θ ; $Z_n(i,j)$ es el punto (i,j) de la zona de la Plataforma dónde se estudia el mapa magnético $s \times t$ (filas x columnas).

$$\begin{aligned} GEPF(x,y,z) &= \frac{1}{\delta_F \times (i_{\max} - i_{\min})} \left[\text{Max} \left(\left. B_{P(i)}^{\rightarrow H, \theta}(x, y, z) \right|_{i \in Z_n} \right) - \text{Min} \left(\left. B_{P(i)}^{\rightarrow H, \theta}(x, y, z) \right|_{i \in Z_n} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{\delta_F \times (i_{\max} - i_{\min})} \left[\left. B_{P(i_{\max})}^{\rightarrow H, \theta}(x, y, z) \right|_{i_{\max} \in Z_n} - \left. B_{P(i_{\min})}^{\rightarrow H, \theta}(x, y, z) \right|_{i_{\min} \in Z_n} \right] \end{aligned} \quad (5.10)$$

$$GEPF_X = \frac{1}{\delta_F \times (ix_{\max} - ix_{\min})} \left[\left. B_{P(ix_{\max})}^{H, \theta}(x) \right|_{ix_{\max} \in Z_n} - \left. B_{P(ix_{\min})}^{H, \theta}(x) \right|_{ix_{\min} \in Z_n} \right] \quad (5.11)$$

$$GEPF_Y = \frac{1}{\delta_F \times (iy_{\max} - iy_{\min})} \left[\left. B_{P(iy_{\max})}^{H, \theta}(y) \right|_{iy_{\max} \in Z_n} - \left. B_{P(iy_{\min})}^{H, \theta}(y) \right|_{iy_{\min} \in Z_n} \right] \quad (5.12)$$

$$GEPF_Z = \frac{1}{\delta_F \times (iz_{\max} - iz_{\min})} \left[\left. B_{P(iz_{\max})}^{H, \theta}(z) \right|_{iz_{\max} \in Z_n} - \left. B_{P(iz_{\min})}^{H, \theta}(z) \right|_{iz_{\min} \in Z_n} \right] \quad (5.13)$$

Dónde, $B_{P(i)}^{\rightarrow H, \theta}(x, y, z)$ es la inducción magnética promediada por filas en el punto $P(i)$ de la fila en una zona de la Tierra H a un rumbo θ ; i_{\max} es el punto i de la inducción magnética promediada por filas dónde ésta alcanza el máximo; i_{\min} es el punto i de la inducción magnética promediada por filas dónde ésta alcanza el mínimo; δ_F es la distancia entre filas en metros.

- Gradiente extendido por columnas (*GEPC*): se realiza el promediado de todas las columnas del mapa magnético (5.14) para cada una de las componentes. Se calcula el máximo y mínimo de la curva resultante. La diferencia entre ellos se divide por la

distancia en metros para obtener la variación en nanoTeslas/metro (nT/m) GEPC(x, y, z) (5.15). Por ello, se establecen tres parámetros para los ejes X , Y y Z , que se denominarán GEPCX (5.16), GEPCY (5.17) y GEPCZ (5.18), respectivamente.

$$PC(j, x, y, z) = \frac{1}{s} \sum_{i=Z_n(1,j)}^{Z_n(s,j)} \left(\vec{B}_{P(i,j)}(x, y, z) \right) \Big|_{i,j \in Z_n} = \vec{B}_{P(j)}(x, y, z) \Big|_{j \in Z_n} \quad (5.14)$$

Dónde, $\vec{B}_{P(i,j)}(x, y, z)$ es la inducción magnética de un punto $P(i,j)$ de la Plataforma en una zona de la Tierra H a un rumbo θ ; $Z_n(i,j)$ es el punto (i,j) de la Zona de la Plataforma dónde se estudia el mapa magnético de dimensiones $s \times t$ (filas x columnas).

$$\begin{aligned} GEPC(x,y,z) &= \frac{1}{\delta_C \times (j_{\max} - j_{\min})} \left[\text{Max} \left(\vec{B}_{P(j)}(x, y, z) \Big|_{j \in Z_n} \right) - \text{Min} \left(\vec{B}_{P(j)}(x, y, z) \Big|_{j \in Z_n} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{\delta_C \times (j_{\max} - j_{\min})} \left[\vec{B}_{P(j_{\max})}(x, y, z) \Big|_{j_{\max} \in Z_n} - \vec{B}_{P(j_{\min})}(x, y, z) \Big|_{j_{\min} \in Z_n} \right] \end{aligned} \quad (5.15)$$

$$GEPCX = \frac{1}{\delta_C \times (j_{\max} - j_{\min})} \left[\vec{B}_{P(j_{\max})}(x) \Big|_{j_{\max} \in Z_n} - \vec{B}_{P(j_{\min})}(x) \Big|_{j_{\min} \in Z_n} \right] \quad (5.16)$$

$$GEPCY = \frac{1}{\delta_C \times (j_{\max} - j_{\min})} \left[\vec{B}_{P(j_{\max})}(y) \Big|_{j_{\max} \in Z_n} - \vec{B}_{P(j_{\min})}(y) \Big|_{j_{\min} \in Z_n} \right] \quad (5.17)$$

$$GEPCZ = \frac{1}{\delta_C \times (j_{\max} - j_{\min})} \left[\vec{B}_{P(j_{\max})}(z) \Big|_{j_{\max} \in Z_n} - \vec{B}_{P(j_{\min})}(z) \Big|_{j_{\min} \in Z_n} \right] \quad (5.18)$$

Dónde, $\vec{B}_{P(j)}(x, y, z)$ es la inducción magnética promediada por columnas en el punto $P(j)$ de la columna en una zona de la Tierra H a un rumbo θ ; j_{\max} es el punto j de la inducción magnética promediada por columnas dónde ésta alcanza el máximo; j_{\min} es el punto j de la inducción magnética promediada por columnas dónde ésta alcanza el mínimo; δ_C es la distancia entre columnas en metros.

- Gradiente máximo del error de rumbo por filas (*GMER*): utilizando las curvas promedio por filas de las componentes X e Y se calculará el valor absoluto del promedio del error del rumbo de la Plataforma $GERPF(i)$ (5.19). Se calcula la diferencia entre el máximo y el mínimo y se divide por la distancia entre puntos en metros para obtener la variación en grados/metro ($^\circ/\text{m}$) de las filas $GMERPF$ (5.20). Lo mismo se realizará para el promedio por columnas y se obtendrá el parámetro $GMERPC$.

$$GERPF(i) = \frac{1}{\delta_F} ABS \left[\frac{180^\circ}{\pi} \times \arctg \left(\frac{B_{P(i)}(x)}{B_{P(i)}(y)} \right) + 360^\circ - (RGeo - Dec) \right] \forall i \in Z_n \quad (5.19)$$

$$GMERPF = \frac{Max(GERPF(i)) - Min(GERPF(i))}{\delta_F \times (i_{\max} - i_{\min})} ; i_{\max} \in Z_n \quad (5.20)$$

$$GERPC(j) = \frac{1}{\delta_C} ABS \left[\frac{180^\circ}{\pi} \times \arctg \left(\frac{B_{P(j)}(x)}{B_{P(j)}(y)} \right) + 360^\circ - (RGeo - Dec) \right] \forall j \in Z_n \quad (5.21)$$

$$GMERPC = \frac{Max(GERPC(j)) - Min(GERPC(j))}{\delta_C \times (j_{\max} - j_{\min})} ; j_{\max} \in Z_n \quad (5.22)$$

H, θ

Dónde, $B_{P(i)}(x)$ es la componente x de la inducción magnética promediada por filas en el punto $P(i)$ de la fila en una zona de la Tierra H a un rumbo θ . La misma expresión se aplica a la componente y de la inducción magnética promediada por columnas. Para la inducción magnética promediada por filas se usan expresiones equivalentes para las componentes X e Y . Z_n es la zona de la Plataforma dónde se estudia el mapa magnético de dimensiones “ $s \times t$ ” (filas x columnas); $RGeo$ es el rumbo geográfico; Dec es la declinación magnética; δ_F es la distancia entre filas en metros; δ_C es la distancia entre columnas en metros.

Como se comentó anteriormente se ha centrado el estudio en la zona Z3 porque es la zona de concentración de la anomalía, el área dónde suelen estar localizados los sensores de rumbo de los helicópteros y porque no existe efecto borde. Los valores calculados de los parámetros definidos anteriormente se muestran en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Valores de los parámetros GE(nT/m) y GMER (°/m) para la zona Z3.

Parámetro	Zona Z3
$GEAFX$	4.827 nT/m
$GEAFY$	3.159 nT/m
$GEAFZ$	8.727 nT/m
$GEPCX$	1.220 nT/m
$GEPCY$	2.869 nT/m
$GEPCZ$	1.730 nT/m
$GMERPF$	12°/m
$GMERPC$	4°/m

Las curvas promedio por filas, por columnas y del error de rumbo para la zona Z3 entre las filas 4 y 12 y entre las columnas 8 y 22 se muestran a continuación. En los promedios por filas de cada una de las componentes se encontraría la influencia de un posible magnetismo transversal. Este se manifestaría por un máximo o mínimo de cierta consideración en la componente *X* y un máximo y un mínimo consecutivos en la componente *Z* cuyo punto de transición o inversión de pendiente se encuentra en el mismo punto que el máximo o mínimo de la componente *X* comentada. La componente *Y* en los promedios por filas no tiene relevancia. La figura 5.17 muestra que se aprecia una componente transversal importante entre 4 y 8 metros en dirección babor-estribor. Esta componente es la responsable de la anomalía magnética en la plataforma *P1*.

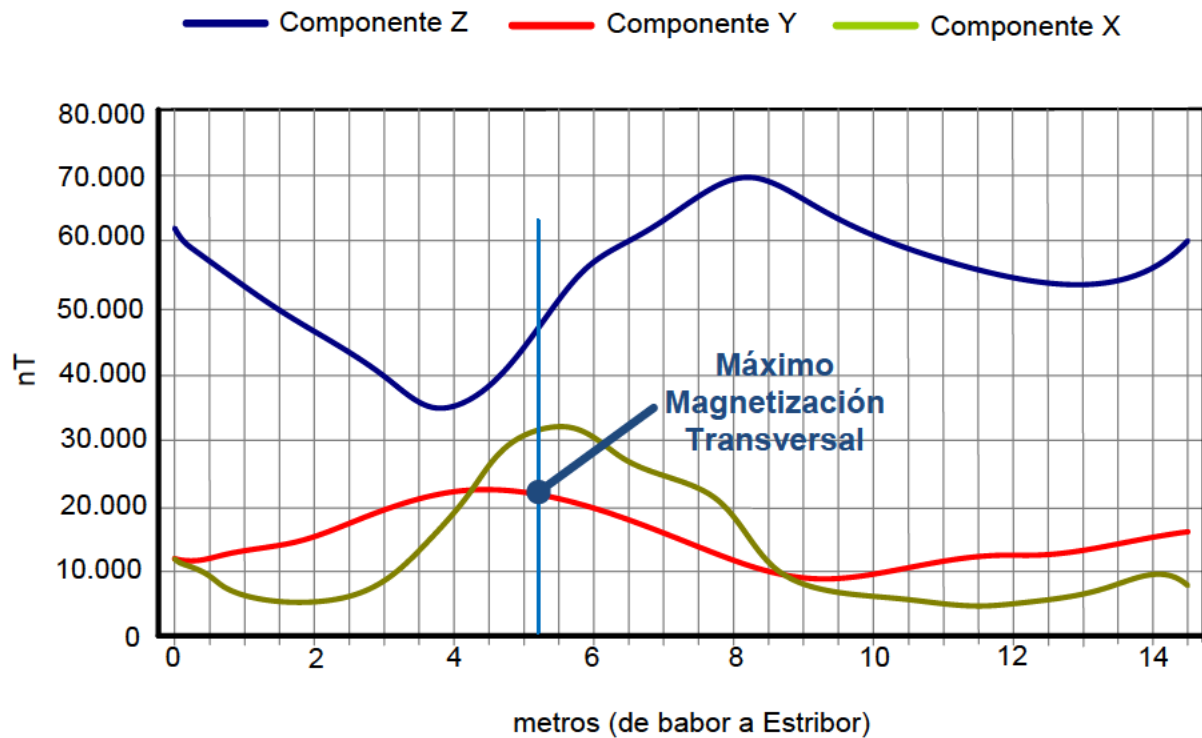


Figura 5.17. Promediado del mapa magnético por filas a rumbo 330° de la plataforma *P1* dentro de la zona Z3.

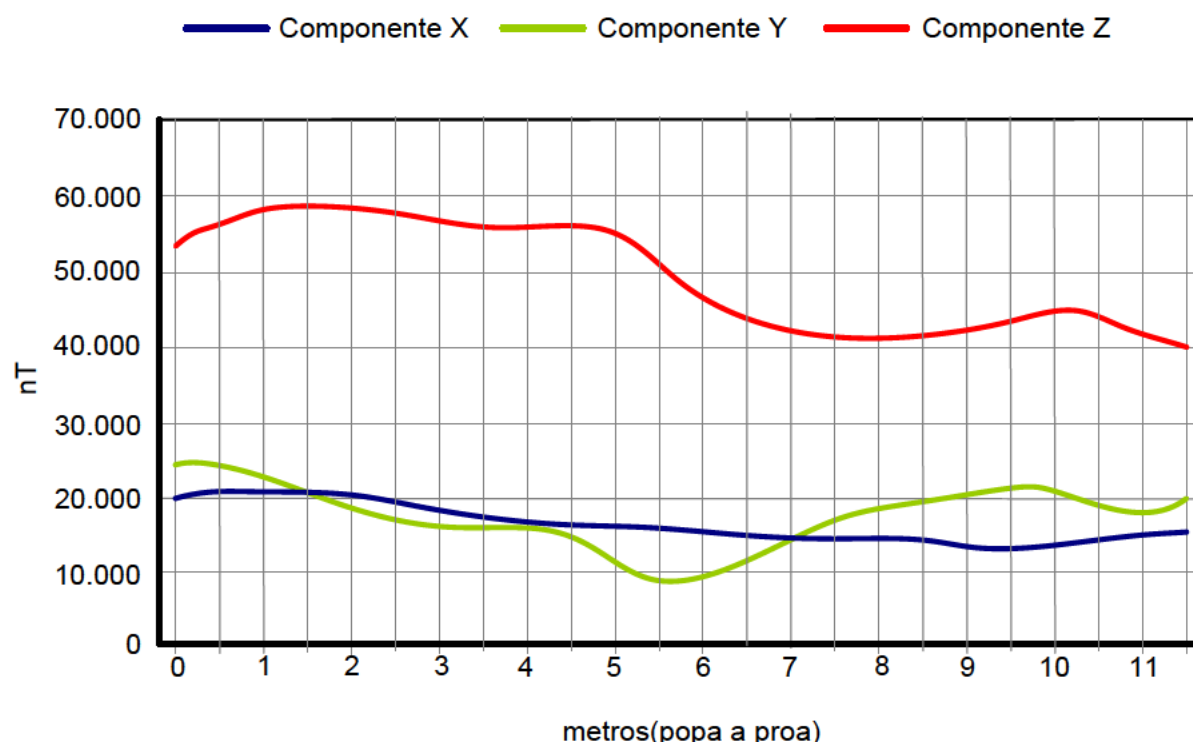


Figura 5.18. Promediado del mapa magnético por columnas de la plataforma *P1* dentro de la zona *Z3*.

En los promedios por columnas de cada una de las componentes se encontraría la influencia de un posible magnetismo longitudinal. Este se manifestaría por un máximo o mínimo de cierta consideración en la componente *Y* y un máximo y un mínimo consecutivos la componente *Z* cuyo punto de transición o inversión de pendiente se encuentra en el mismo punto que el máximo o mínimo de la componente *Y* comentada. La componente *X* en los promedios por filas no tiene relevancia. La figura 5.18 muestra lo comentado dónde no se aprecia ninguna componente longitudinal significativa.

Así mismo el promediado por columnas presenta una componente vertical importante. Dicha vertical no tiene efecto sobre una brújula u otro tipo de sensor magnético que utilice la componente horizontal del campo magnético existente para dar información del rumbo magnético y, por tanto, esta anomalía vertical no será considerada en nuestro trabajo.

Por otro lado, tomando las componentes *X* e *Y* de los promedios por filas y columnas se calcula el valor del error de rumbo para cada uno de ellos (figura 5.19); se han utilizado las ecuaciones (5.19) y (5.21) para el error del promedio por filas y del promedio por columnas, respectivamente. El error máximo se encuentra en la zona central entre las bandas de babor y estribor y a unos 6 metros de la popa que llega a ser de unos 75° (gráfica de color azul). Entre 5 y 8,5 metros desde babor la anomalía presenta un valor prácticamente constante.

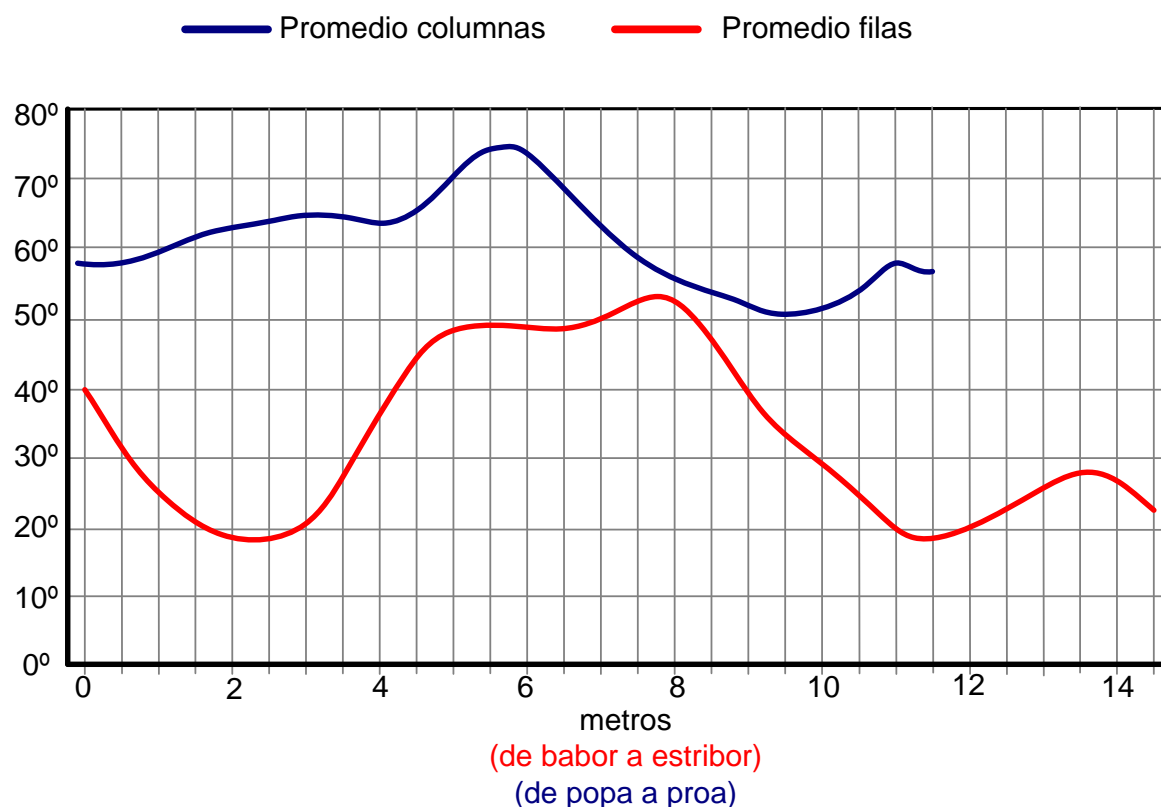


Figura 5.19. Error de rumbo promediado de la plataforma *P1* en la zona *Z3*.

5.6 Conclusiones

El sistema diseñado, el procedimiento de medida y el método de análisis de los datos magnéticos han mostrado los resultados esperados y han permitido establecer la naturaleza de la anomalía magnética (magnetización transversal) y su cuantificación (parametrización) sobre la zona de influencia de los sensores de rumbo de los helicópteros que realicen operaciones de vuelo sobre ella. Para poder estudiar el resto de buques de la serie y debido a lo laborioso del procedimiento de medida se decidió diseñar un nuevo sistema de registro de datos que permita la captura simultánea de varias columnas y la captura automática de los mismos a lo largo de una fila o columna.

Capítulo 6

Levantamiento de mapas magnéticos locales con dispositivo multi-sensor

6.1 Introducción

El levantamiento sistemático de mapas magnéticos sobre cubiertas de vuelo conlleva un elevado tiempo de preparación de la medida (marcado de los puntos) y posicionado del sensor y lectura de los valores de campo magnético de cada uno de los ejes. Para evitar todo esto se diseñó una plataforma de captura multi-sensor automatizada que permite la captura simultánea de varias líneas del mallado y la nivelación de la misma.

El nuevo sistema de medida multisensor lleva asociado un cambio en el procedimiento de trabajo. Fundamentalmente se trata de implementar todos los cambios matriciales de datos para poder trabajar de forma directa con los datos capturados. Se van a presentar las medidas realizadas con el nuevo sistema multi-sensor en tres buques de la misma clase y se analizará el comportamiento magnético sobre la zona de interés de la cubierta de vuelo utilizando los parámetros introducidos en el capítulo anterior.

6.2 Diseño de un dispositivo de captura semiautomático multi-sensor

6.2.1 Diagrama de bloques

Los elementos que componen el sistema completo son los siguientes:

- Soporte de material no magnético.
- Ordenador portátil.

- Software de captura y grabación.
- Tres magnetómetros triaxiales.
- *Encoder* digital.
- Inclinómetro de dos ejes.
- Baterías.
- Caja de interconexión.
- Cables de interconexión entre los diferentes elementos.

El conjunto se compone de una plataforma móvil de material no magnético y una serie de elementos electrónicos y sensores magnéticos. La señal magnética la suministran tres magnetómetros triaxiales. Un inclinómetro de dos ejes da los valores de “balanceo” y “cabeceo” en el punto de medida. La distancia desde el origen de medida la proporciona un *encoder* digital para el muestreo automático desde el ordenador de control. Todas estas señales se capturan con una tarjeta de adquisición de datos externa con conexión USB. Un ordenador portátil tiene instalado el software de captura y grabación de las señales registradas. Todo el conjunto incluye las baterías de alimentación necesarias para tener una autonomía mínima de una hora, teniendo en cuenta que el ordenador portátil tiene una batería propia. La figura 6.1. muestra un diagrama de bloques del conjunto de medida descrito anteriormente. Las características detalladas de los sensores y tarjeta de adquisición se muestran en el apéndice B.

El inclinómetro juega un papel importante debido a que la superficie no es perfectamente plana y presenta rugosidades que afectan a los valores del campo magnético medido. Los ángulos de balance y cabezada son utilizados para compensar dichas irregularidades de la superficie.

Para calcular el ángulo de medida del sensor de inclinación dentro del margen angular completo ($\pm 75^\circ$) se utiliza la ecuación (6.1).

$$\phi = \text{seno}^{-1} \left[\frac{V_{out} - \text{VoltajeCero}}{\text{Sensibilidad}} \right] \quad (6.1)$$

Dónde V_{out} es el nivel de voltaje de las patillas de balance y cabezada. VoltajeCero es el valor en voltios cuando el ángulo de balance o cabezada es de cero grados. La sensibilidad en mV/° es un parámetro característico del sensor.

Para ángulos menores a $\pm 20^\circ$, el ángulo de la ecuación puede aproximarse por la expresión (6.2).

$$\phi \cong \frac{V_{out} - \text{VoltajeCero}}{\text{Sensibilidad}} \quad (6.2)$$

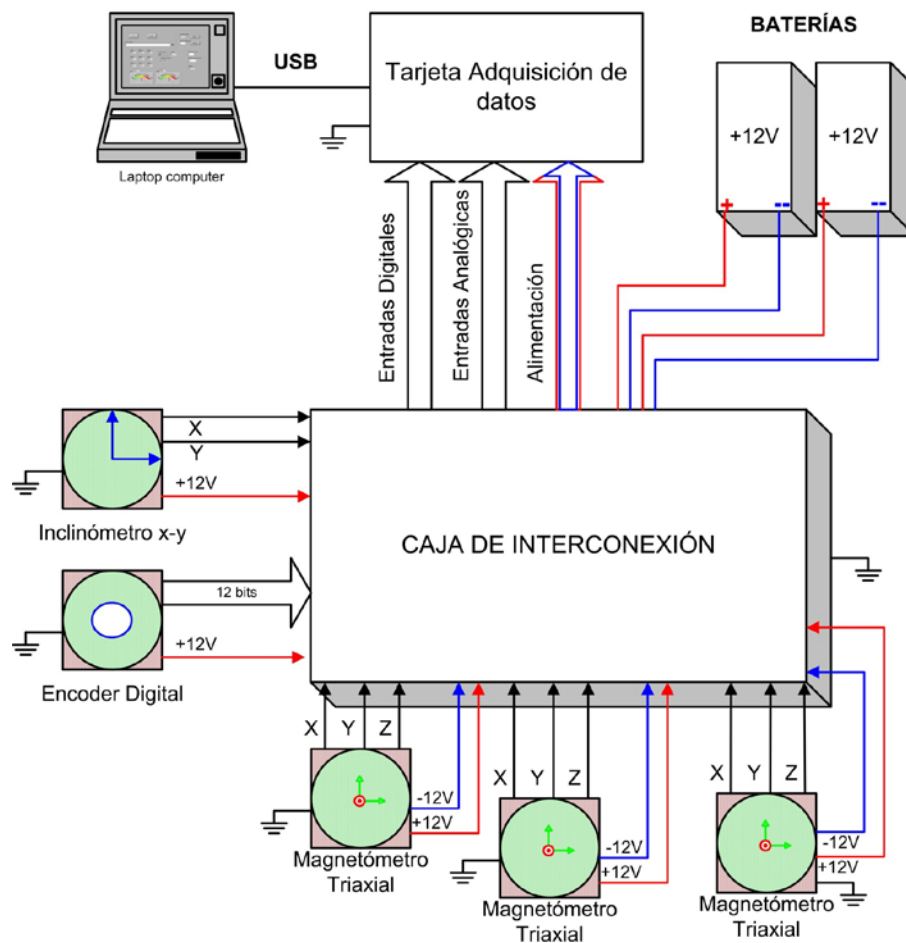


Figura 6.1. Diagrama de bloques de la plataforma multisensor.

6.2.2 Plataforma de medida.

La plataforma de medida tiene el aspecto de la figura 6.2. A parte de los elementos anteriormente comentados tiene las siguientes características:

- Base de 55 x 100 x 31 cm.
- Ruedas neumáticos con cámaras.
- Ruedas traseras oscilantes con sistema de enclavamiento.
- Altura de los sensores variable entre 44 y 115 cm.
- Bandeja para ordenador portátil.
- Bandejas y demás elementos desmontables y plegables.
- Soportes para elementos vertical y horizontal de apuntamiento.
- Materiales empleados aluminio y bronce (no magnéticos).

Se ha comprobado que el ordenador portátil no tiene efecto sobre los magnetómetros a la distancia a la que están de los mismos.

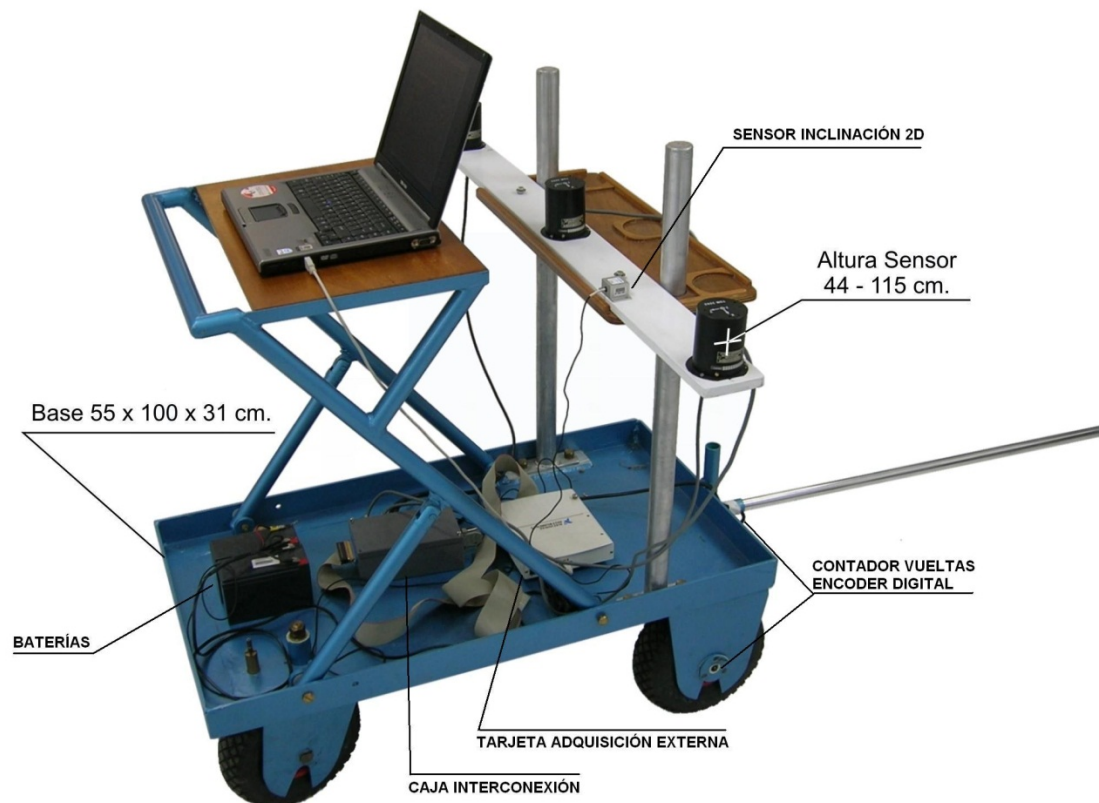


Figura 6.2. Plataforma no magnética para el mapeo de superficies.

En la figura 6.2 puede apreciarse un soporte de aluminio plegable dónde se alojan en su parte inferior las baterías, la caja de interconexión y la tarjeta de adquisición de datos. Los ejes de las ruedas y articulaciones son de bronce. La rueda delantera derecha lleva montado el *encoder* digital para la medida de distancias y es la referencia para la captura de datos según el ancho del mallado definido. En la parte superior se incluye una bandeja para colocar el ordenador con el software de captura en la parte trasera. En la delantera existe otra bandeja regulable en altura sobre la que se montan los tres magnetómetros. El sensor de inclinación está situado sobre la misma superficie sobre a que se montan los magnetómetros.

6.2.3 Software de captura

La captura de datos es controlada por un software desarrollado en *LabView* y se ejecuta desde un ordenador portátil situado sobre la plataforma de aluminio. El diagrama de bloques del programa de captura y el aspecto del interfaz de usuario se muestran en las figuras 6.3 y 6.4, respectivamente. El primer paso que se debe realizar es calibrar el sistema. El procedimiento consiste en marcar una distancia en el suelo e introducirla en el cuadro de texto de la ventana habilitado para tal efecto. La plataforma debe recorrer la distancia marcada y finalizar la calibración. En dicho proceso el ordenador calcula el número de pasos que el *encoder* digital ha enviado durante la distancia recorrida durante la calibración.

Cuando se inicia la captura la ventana monitoriza los valores de todos los sensores que intervienen en el proceso (los tres magnetómetros triaxiales, el *encoder* digital y el inclinómetro de dos ejes).

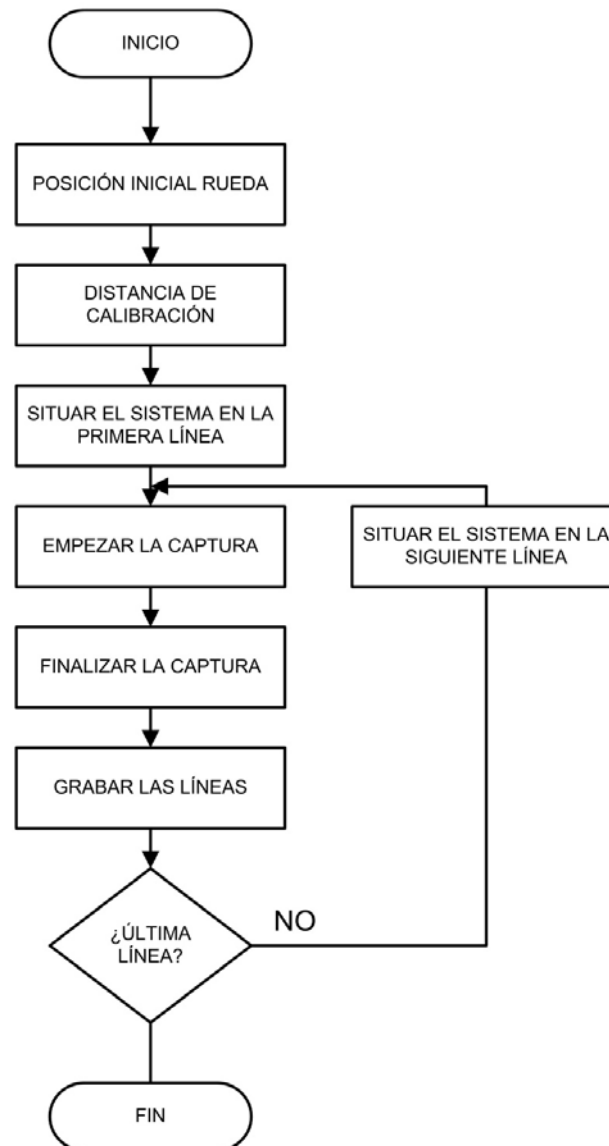


Figura 6.3. Diagrama de bloques del software de captura.

El formato de salida de los datos de cada grupo de tres líneas es un fichero ASCII de 14 columnas, representando cada una de ellas los siguientes parámetros: Posición / Giro eje X ($^{\circ}$) / Giro eje Y ($^{\circ}$) / $M1X$ (nT) / $M1Y$ (nT) / $M1Z$ (nT) / $M2X$ (nT) / $M2Y$ (nT) / $M2Z$ (nT) / $M3X$ (nT) / $M3Y$ (nT) / $M3Z$ (nT) / Giro eje X (voltios) / Giro eje Y (voltios). En la tabla 6.1 están definidas las variables utilizadas en el fichero. En el Apéndice D se muestra un ejemplo de la tabla de captura.

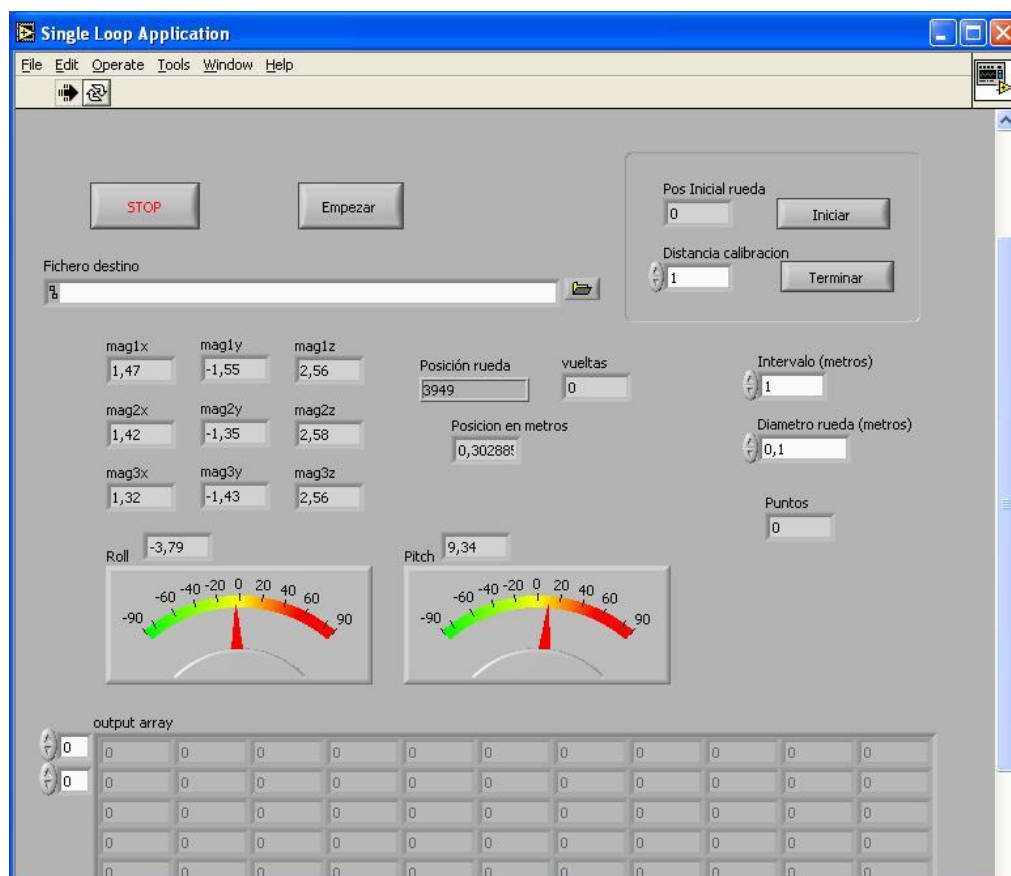


Figura 6.4. Pantalla de captura de datos del software de captura de datos magnéticos.

Tabla 6.1. Formato del fichero ASCII de los datos grabados por el sistema multi-sensor.

Variable	Definición
<i>Posición</i>	Valor de la distancia en metros de la posición del punto de captura dentro de la línea (columna) de medida.
<i>Giro eje X (°)</i>	Ángulo en grados de la componente X del inclinómetro.
<i>Giro eje Y (°)</i>	Ángulo en grados de la componente Y del inclinómetro.
<i>M1X (nT)</i>	Valor en nanoTeslas de la componente X del magnetómetro 1.
<i>M1Y (nT)</i>	Valor en nanoTeslas de la componente Y del magnetómetro 1.
<i>M1Z (nT)</i>	Valor en nanoTeslas de la componente Z del magnetómetro 1.
<i>M2X (nT)</i>	Valor en nanoTeslas de la componente X del magnetómetro 2.
<i>M2Y (nT)</i>	Valor en nanoTeslas de la componente Y del magnetómetro 2.
<i>M2Z (nT)</i>	Valor en nanoTeslas de la componente Z del magnetómetro 2.
<i>M3X (nT)</i>	Valor en nanoTeslas de la componente X del magnetómetro 3.
<i>M3Y (nT)</i>	Valor en nanoTeslas de la componente Y del magnetómetro 3.
<i>M3Z (nT)</i>	Valor en nanoTeslas de la componente Z del magnetómetro 3.
<i>Giro eje X (Voltios)</i>	Valor del ángulo en voltios de la componente X del inclinómetro.
<i>Giro eje Y (Voltios)</i>	Valor del ángulo en voltios de la componente Y del inclinómetro.

6.3 Procedimiento de medida

El primer paso de la medida es el montaje de todos los componentes del equipo de medida y la comprobación de su funcionamiento con el software de captura. Una vez comprobado su correcto funcionamiento se realizarán los siguientes pasos:

1. Calibración del sistema de medida. Este procedimiento se describió en el apartado anterior.
2. Establecimiento de los parámetros de la medida: espaciado del mapeo y altura de la medida.
3. Marcado de las líneas de recorrido de la superficie teniendo en cuenta que se medirán simultáneamente tres líneas (tres magnetómetros).
4. Empujar el sistema de medida de forma que tenga la orientación de las líneas utilizando el sistema visual de apuntamiento. Una vez finalizada cada grupo de tres líneas se graba en un fichero.

Con los datos grabados, una vez restado el campo magnético terrestre en la zona, se deben hacer las siguientes transformaciones:

- Corrección de los ángulos de balanceo y cabeceo según la ecuación (6.3).
- Cambio de sistema de referencia del equipo de medida al de la plataforma según la ecuación (6.4). Ver figura 6.5.
- Cambio de la secuencia de medida según la expresión (6.5).
- Establecimiento de las dimensiones espaciales de los puntos de muestreo según (6.6).

Para la corrección de los ángulos de inclinación (“cabeceo y balanceo” o “pitch y roll”) se utilizan la expresión matricial (6.5).

$$\begin{pmatrix} B'_x(i, j, z_0) \\ B'_y(i, j, z_0) \\ B'_z(i, j, z_0) \end{pmatrix} = (\Phi) \cdot \begin{pmatrix} B_x(i, j, z_0) \\ B_y(i, j, z_0) \\ B_z(i, j, z_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \text{sen} \alpha \cdot \text{sen} \beta & \text{sen} \beta \cdot \cos \alpha \\ 0 & \cos \alpha & -\text{sen} \alpha \\ -\text{sen} \beta & \text{sen} \alpha \cdot \cos \beta & \cos \alpha \cdot \cos \beta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_x(i, j, z_0) \\ B_y(i, j, z_0) \\ B_z(i, j, z_0) \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

Dónde $B_x(i, j, z_0)$, $B_y(i, j, z_0)$ y $B_z(i, j, z_0)$ son las componentes del campo magnético medido en cada punto (i, j, z_0) sin realizar ninguna transformación. $B'_x(i, j, z_0)$, $B'_y(i, j, z_0)$ y $B'_z(i, j, z_0)$ son las componentes del campo magnético con los ángulos de cabeceo y balanceo compensados. La matriz (Φ) es la matriz de corrección de dichos ángulos.

La segunda transformación aplicada a los datos medidos es el cambio de sistema de referencia:

$$\begin{pmatrix} B''_x(i, j, z_0) \\ B''_y(i, j, z_0) \\ B''_z(i, j, z_0) \end{pmatrix} = (\Gamma) \cdot \begin{pmatrix} B'_x(i, j, z_0) \\ B'_y(i, j, z_0) \\ B'_z(i, j, z_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B'_x(i, j, z_0) \\ B'_y(i, j, z_0) \\ B'_z(i, j, z_0) \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

Dónde, $B_x''(i, j, z_0)$ es el valor de la componente X de la inducción magnética medida en el punto (i, j) de la superficie a una altura Z_0 de la misma. De manera similar, $B_y''(i, j, z_0)$ y $B_z''(i, j, z_0)$, son los valores de las componentes Y y Z .

(Γ) es la matriz de cambio de ejes en el sistema de referencia de la Plataforma. Es una matriz diagonal dónde un “1” deja la componente como está y un “-1” la invierte de sentido. En nuestro caso se invierten sólo las componentes X y Z . En la figura 6.5 se detalla en forma de esquema este cambio de sistema de referencia.

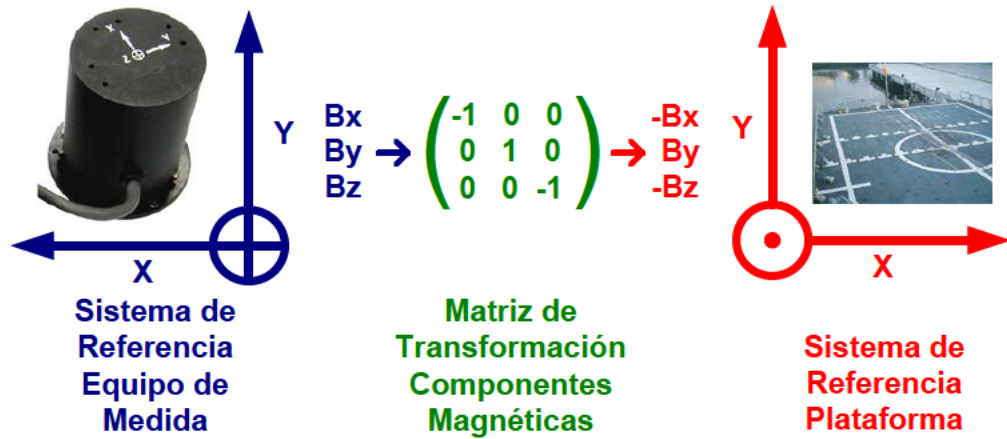


Figura 6.5. Cambio de sistema de referencia del equipo de medida al de la plataforma.

La secuencia de la medida por columnas también necesita de transformación dependiendo si se comienza por la columna 1 o por la 30 (el mallado consta de 24 filas y 30 columnas). Por ejemplo, si se capturan las columnas en orden inverso (la primera columna capturada es la 30 y la última la 1) habría que aplicarle a la secuencia de puntos capturados la matriz diagonal secundaria (30 x 30) de la ecuación (6.5).

$$\begin{pmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & P_{1,29} & P_{1,30} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & P_{2,29} & P_{2,30} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ P_{23,1} & P_{23,2} & \vdots & P_{23,29} & P_{23,30} \\ P_{24,1} & P_{24,2} & \vdots & P_{24,29} & P_{24,30} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{1,30} & P_{1,29} & \dots & P_{1,2} & P_{1,1} \\ P_{2,30} & P_{2,29} & \dots & P_{2,2} & P_{2,1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ P_{23,30} & P_{23,29} & \vdots & P_{23,2} & P_{23,1} \\ P_{24,30} & P_{24,29} & \vdots & P_{24,2} & P_{24,1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \vdots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \vdots & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

Por último, para una secuencia de captura de columnas aleatoria la matriz de ordenación tendrá en la columna n todos los elementos con un “0” excepto el elemento cuya posición m corresponda al número de orden de la columna medida. Debido a que la secuencia de captura dependerá en muchas ocasiones de la libre disposición de las zonas de cubierta bajo estudio esta matriz será la responsable de ordenar las columnas de captura independientemente de la secuencia de medida.

Para establecer las dimensiones espaciales reales de los puntos de muestreo en metros habrá que tener en cuenta el ancho del mallado, el tipo de codificador de pulsos, el número de columna y la altura de la medida. El valor de las tres coordenadas de los puntos de medida en metros se utilizará la ecuación (6.6).

$$\begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2\pi \cdot r}{2^{n_{bits}}} & 0 & 0 \\ 0 & Dy & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} \quad (6.6)$$

Dónde nx son los pulsos del codificador digital, ny es el número de columna muestreado y nz es la altura de medida. (rx, ry, rz) es la posición en metros de los puntos de captura. Dy es la separación entre columnas. r es el radio de la rueda del sistema de medida y n_{bits} el número de bits del *encoder* digital.

6.4 Levantamiento del mapa magnético de la Plataforma P2

Esta plataforma pertenece al segundo buque de la serie y, como la anterior, tiene las siguientes características:

- Descripción: Zona de aterrizaje de helicópteros.
- Dimensiones: 14,5 x 11,5 m².
- Orientación: 330° geográficos. La orientación del helicóptero sobre la cubierta es con la proa apuntando al rumbo comentado.
- Material: acero naval.

En este apartado se mostrarán los mapas levantados en una vista tridimensional y se realizará una estimación del tipo de dipolos que podrían ser los causantes de la anomalía magnética en la zona donde aparecen. Se puede entender que los dipolos verticales, longitudinales o transversales son capaces de compensar esa variación de campo; dichos dipolos pueden ser bobinas diseñadas para que produzcan el efecto compensatorio en el área de influencia. Estas bobinas no pueden ser las bobinas de degaussing ya que estas abarcan un área mucho más amplia (25m²) y no son capaces de compensar la magnetización de una zona muy localizada (2m²). Por lo tanto, una solución posible a la compensación de esta anomalía sería situar nuevas bobinas más pequeñas en las zonas adecuadas como se desarrolla en el capítulo 7.

La figura 6.6 corresponde a la componente transversal de la plataforma P2 y muestra dos dipolos en la fila 1, la situada más a popa. Un dipolo transversal medido por el eje transversal del magnetómetro (eje X) se manifiesta en un hundimiento en la zona con un mínimo en la posición del dipolo, que en este caso, es la de popa-babor (punto (4,1)).

El dipolo vertical tiene un máximo y un mínimo (función par) cuando se mide con el eje transversal del magnetómetro. Su posición es popa-estribor en el punto (24.5, 1), y coincide con el punto de inflexión o cambio del signo de la curva.

Aunque existen otros puntos en los que se podrían establecer la presencia de otros dipolos se considera que no tienen entidad suficiente, por lo que el resto de las variaciones en la cubierta de vuelo se asumen que son debidas a la magnetización transversal de la Plataforma.

La zona de crujía-popa del mapa presenta un valor intermedio de tonalidad verde, la cual es una zona con poca influencia de la magnetización transversal. En dicha zona el campo transversal de la tierra sería el dominante, y es el lugar dónde queda posicionada la cola del helicóptero en el momento del despegue.

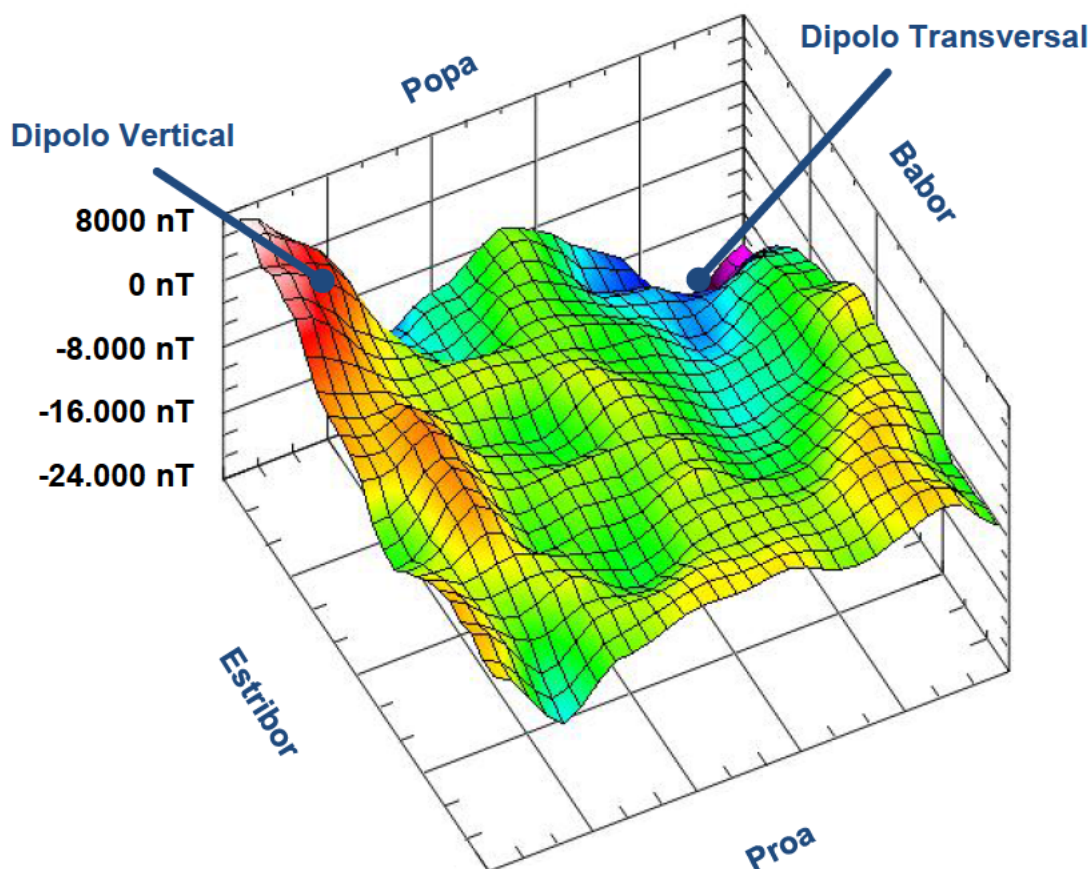


Figura 6.6. Componente transversal campo magnético plataforma P2.

La componente longitudinal del mapa magnético (eje Y de los magnetómetros; figura 6.7) presenta el efecto de tres dipolos longitudinales fuera de la zona de influencia. Dichos dipolos se encuentran situados en los puntos (25,6), (1.5, 3.5) y (13,2). Existe una línea que delimita dos zonas claramente diferenciadas pero se desconoce si está producido por una magnetización vertical situada a lo largo de dicha línea u otra longitudinal situada en popa. También puede estar relacionada con el campo magnético terrestre con la Plataforma orientada al rumbo verdadero 330°; la resultante de las componentes permanentes e inducidas longitudinales sería la responsable de dicha línea.

En cualquiera de los casos, y teniendo en cuenta la zona de popa-crujía, se puede pensar en que la componente longitudinal del campo magnético podría influir en el rumbo indicado por un instrumento situado en dicha zona.

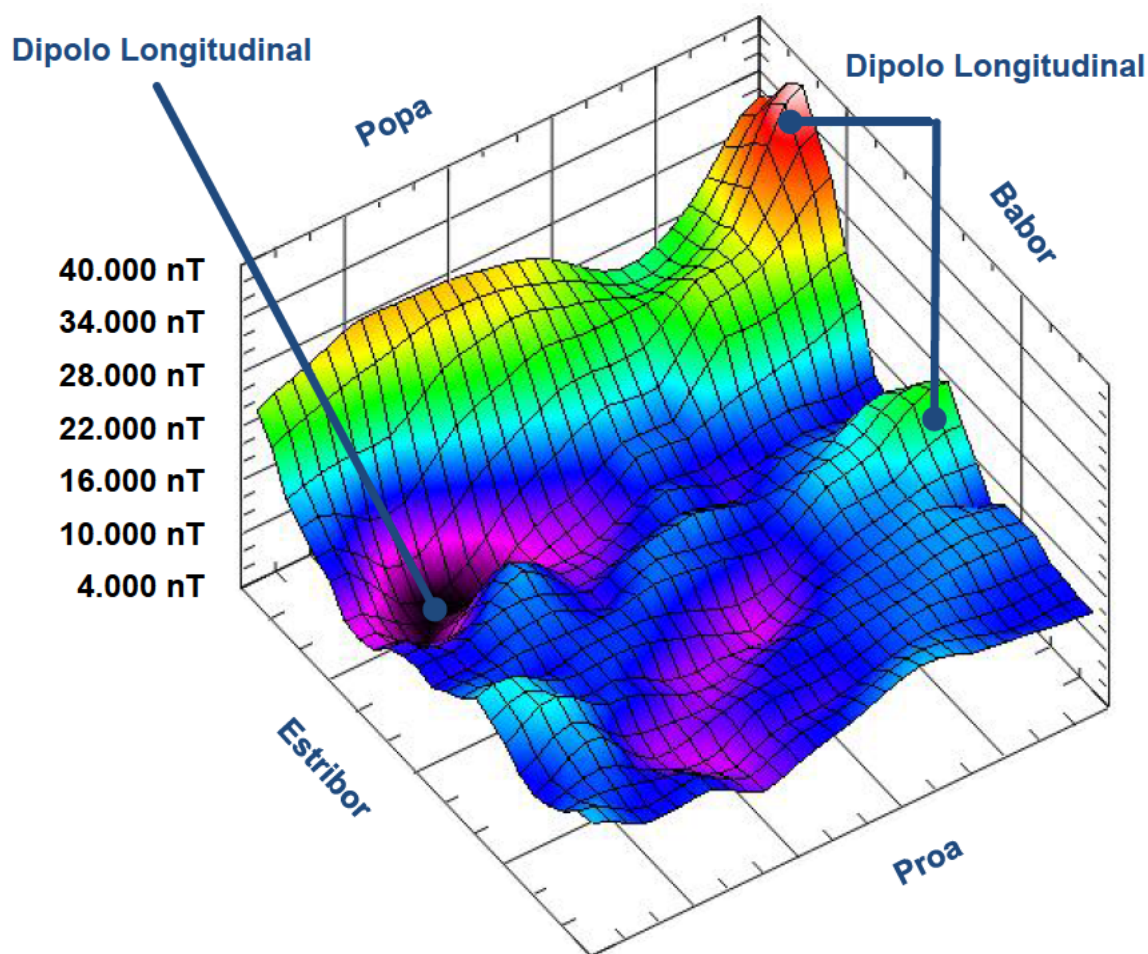


Figura 6.7. Componente longitudinal campo magnético plataforma P2.

La componente vertical del mapa magnético (eje Z de los magnetómetros; figura 6.8) presenta el efecto de la presencia de dos dipolos, uno longitudinal y otro vertical. Dichos dipolos se encuentran situados en los puntos (1,4) y (24, 2.5), respectivamente. Se puede pensar que la fila 1 (la de más a popa) presenta dos dipolos transversales en los puntos (7,1) y (19, 2.5) aunque de pequeña magnitud. En cualquier caso la zona de popa-crujía es bastante uniforme comparada con las otras Plataformas medidas, como se verá posteriormente.

Las componentes transversal y longitudinal nos permiten calcular el rumbo que mediría un sensor situado a 1 metro de la plataforma P2. Teniendo en cuenta la declinación magnética de la zona de la Tierra donde estaba situado el buque el día de la medida [25], se utilizará la ecuación (5.1) para calcular el error absoluto de rumbo.

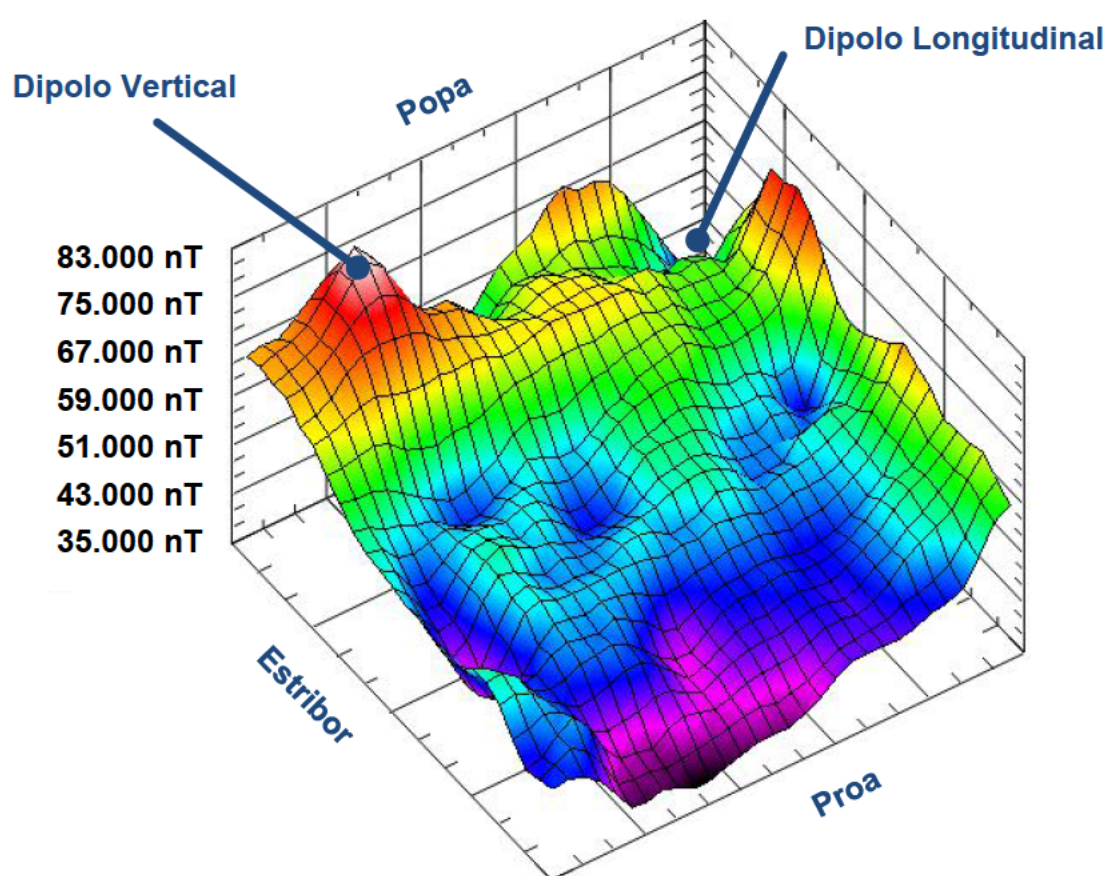


Figura 6.8. Componente vertical campo magnético plataforma *P2*.

La plataforma *P2* estaba el día de las medidas en las coordenadas geográficas $37^{\circ} 33' 26''$ N y $1^{\circ} 18' 21''$ O, a un rumbo geográfico de 330° y la declinación magnética era de $-1,7^{\circ}$ (Oeste).

En la figura 6.9 se muestra el error de rumbo y no presenta una anomalía similar a la observada en la plataforma *P1*. En el caso de la anomalía de la plataforma *P1* se localizaba una elevación importante en la zona de crujía, desde popa hacia proa. En este caso los valores que se muestran en la zona señalizada en la figura 6.9 son valores que están en el promedio del error de rumbo de la zona *Z1*, por lo que, en principio, no será necesario compensarla tal y como se verá posteriormente en el capítulo 7. Hay que tener en cuenta que siempre tendremos sobre una superficie ferromagnética una anomalía magnética por lo que habrá que distinguir si esa anomalía es admisible o no, porque pueda tener influencia sobre las operaciones de vuelo de los helicópteros sobre la plataforma.

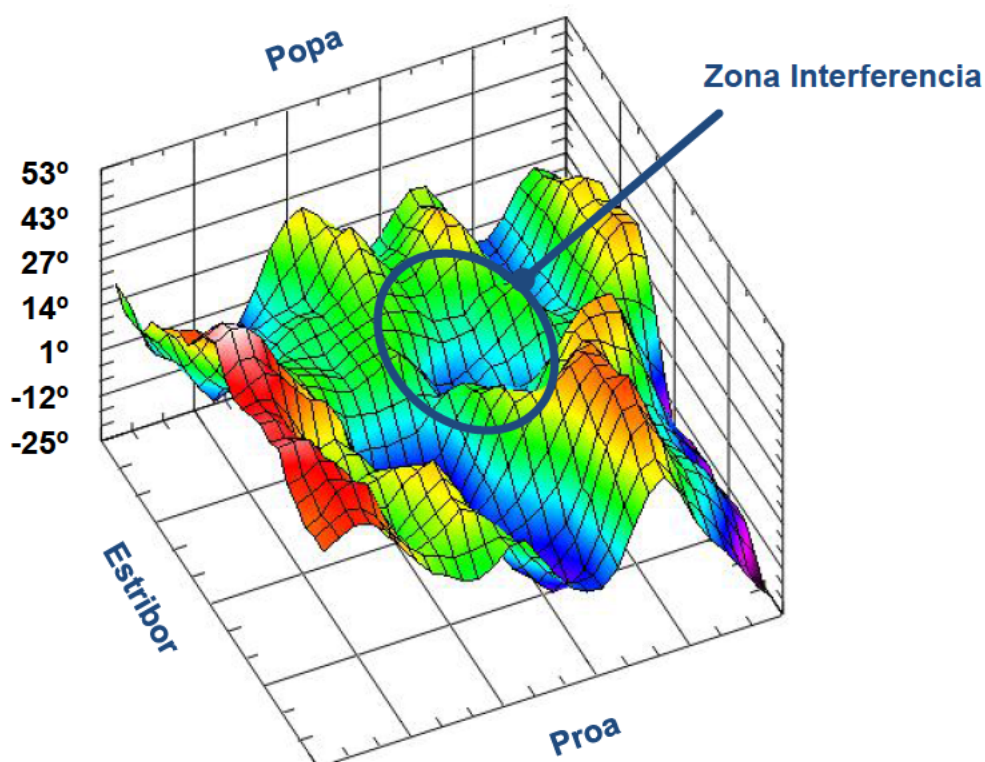


Figura 6.9. Error de rumbo en la plataforma *P2*.

6.4.1. Mapas 2D

Al igual que se hizo para la plataforma *P1*, para poder visualizar con precisión las cuatro zonas sobre las que se van a evaluar los parámetros definidos en el capítulo 5, se muestran en las figuras 6.10, 6.11, 6.12 y 6.13 las gráficas de las componentes magnéticas y del error de rumbo en gradiente de colores en dos dimensiones. También pueden observarse en estas gráficas la situación de los dipolos transversales, longitudinales y verticales que a priori son los responsables de los máximos y mínimos dentro del mallado.

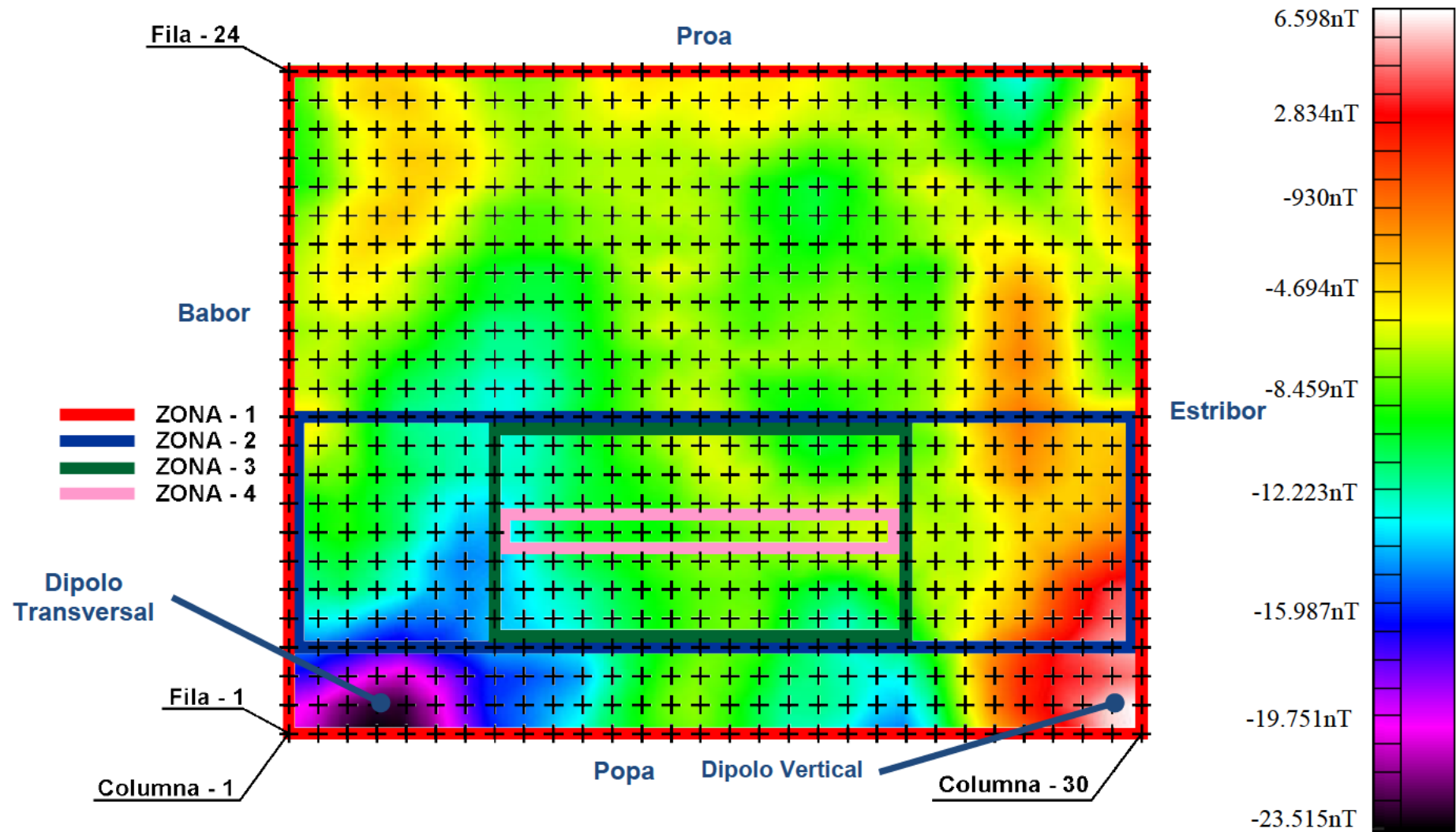


Figura 6.10. Zonas de estudio de la componente magnética transversal en la plataforma P2.

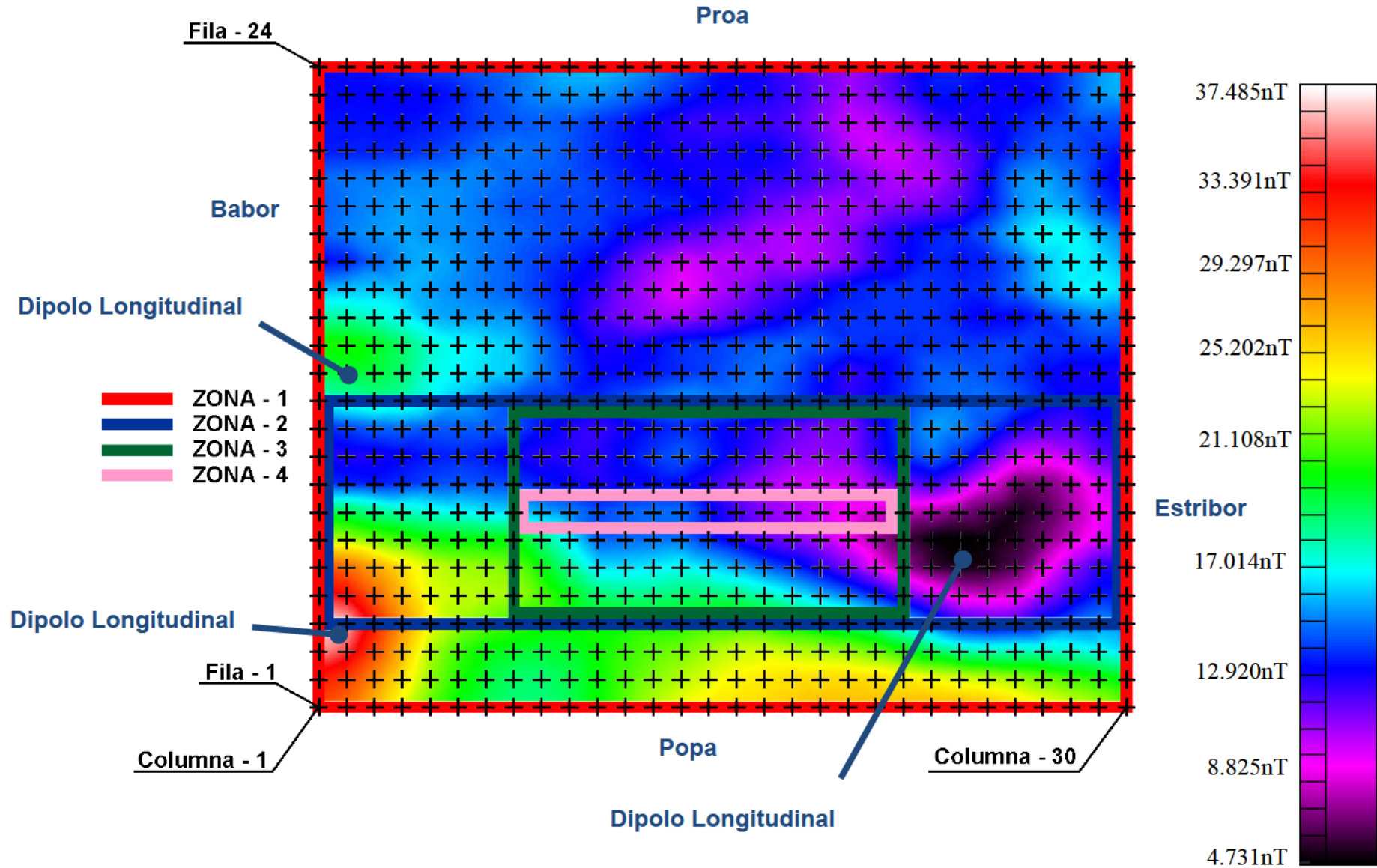


Figura 6.11. Zonas de estudio de la componente magnética longitudinal en la plataforma P2.

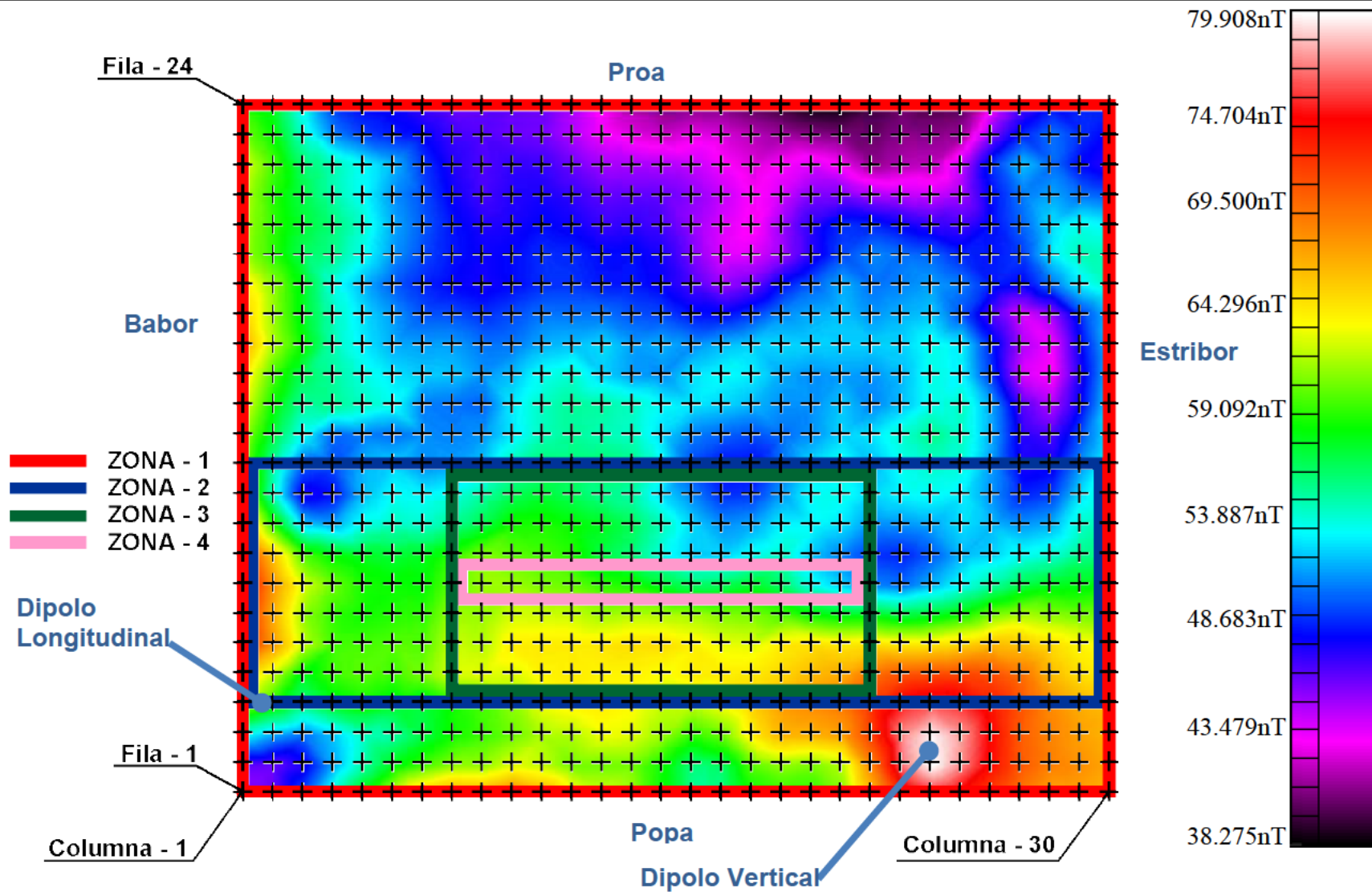


Figura 6.12. Zonas de estudio de la componente magnética vertical en la plataforma P2.

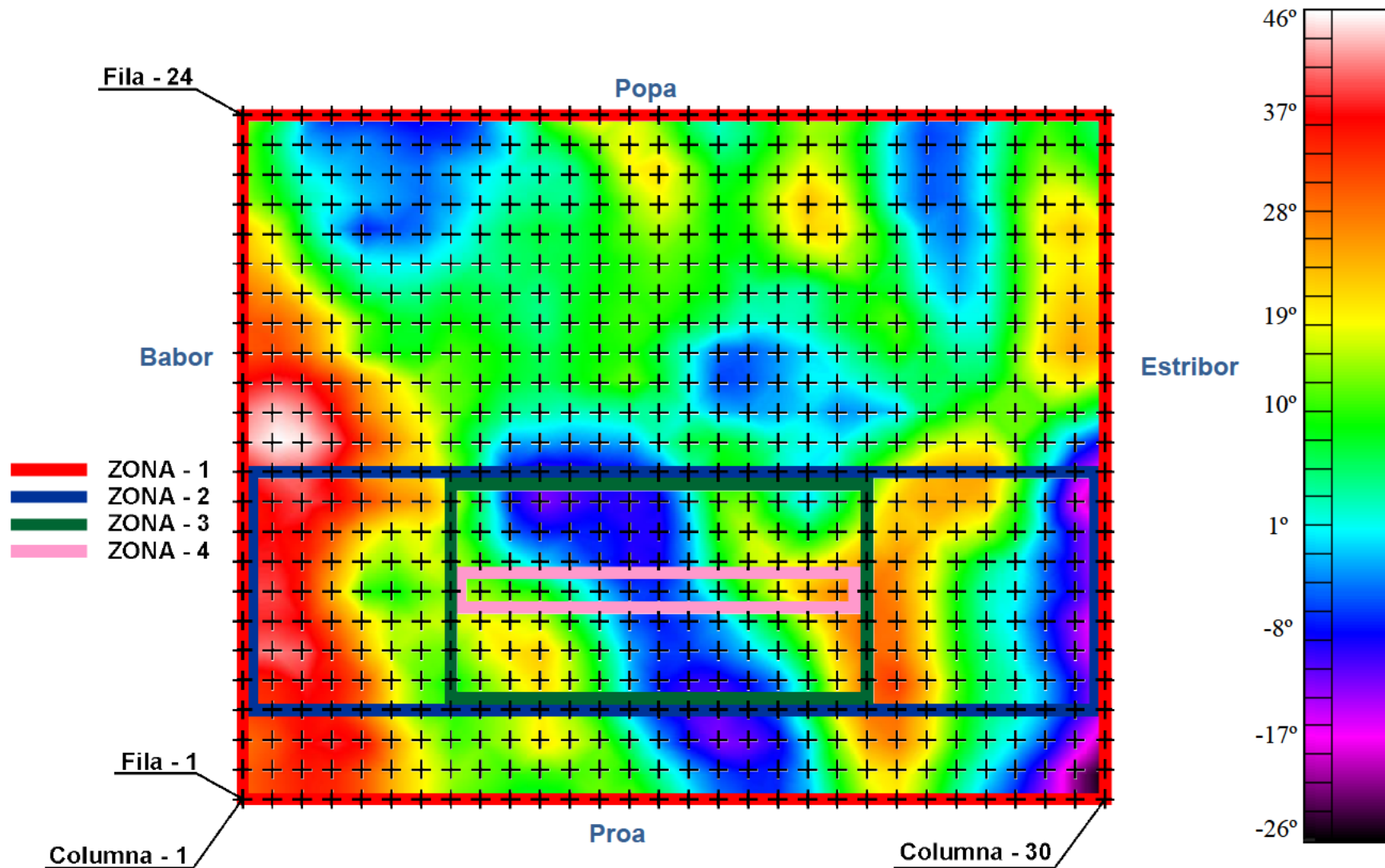


Figura 6.13. Zonas de estudio del error de rumbo magnético a 1 metro de la superficie de la plataforma P2.

6.4.2. Análisis de resultados

Al igual que se hizo con la Plataforma *PI* se van a analizar los datos capturados teniendo en cuenta los parámetros y procedimientos ya definidos. Esto nos permitirá cuantificarlos y posteriormente compararlos con otras medidas similares realizadas a otras plataformas dedicadas al mismo uso.

Los seis primeros parámetros definidos para la Plataforma *PI* en el capítulo 5 se aplican a los datos de la inducción magnética medidos en la nueva Plataforma. Son los siguientes:

- *VMAX*, *VMIN* y *VPRO* (ecuaciones (5.2), (5.3) y (5.4)): representan al valor máximo, mínimo y promedio de la inducción magnética medida en la zona de interés, respectivamente.
- *VAEmax*, *VAEmin* y *PVAE* (ecuaciones (5.6), (5.7) y (5.8)): son los valores máximo, mínimo y promedio del error de rumbo calculado con la expresión (5.5).

En las tablas 6.2 y 6.3 se reflejan los valores de estos parámetros para la zona *Z1* (área delimitada por los puntos (1,1), (30,1), (30,24) y (1,24); incluye el efecto del borde de la cubierta debido a las bandas de babor y estribor y la zona de popa), zona *Z2* (área delimitada por los puntos (1,4), (30,4), (30,12) y (1,12); zona donde la anomalía magnética tendría efecto e incluye el efecto borde de las bandas de babor y estribor), zona *Z3* (área comprendida entre los puntos (8,4), (23,4), (23,12) y (8,12); es la zona *Z2* sin tener en cuenta el efecto borde) y zona *Z4* (comprende una única línea entre los puntos (8,8) y (23,8). Está situada en el centro de la zona de anomalía magnética).

Tabla 6.2. Valores máximo, mínimo y promedio de la densidad de flujo magnético.

X,Y,Z	Zona	VMAX	VMIN	VPRO	Zona	VMAX	VMIN	VPRO
X	1	6.598	-23.515	-7.173	3	-5.132	-13.249	-8.191
	2	5.657	-16.966	-7.384	4	-5.306	-13.301	-8.130
Y	1	37.485	4.731	15.330	3	23.863	4.953	14.223
	2	37.485	4.731	14.733	4	16.206	7.901	12.316
Z	1	79.908	38.275	55.472	3	75.449	48.810	59.330
	2	76.514	48.150	59.462	4	62.331	51.454	58.320

Tabla 6.3. Valores máximo, mínimo y promedio del error de rumbo.

Parámetro	Zona	VAEmax	VAEmin	PVAE	Zona	VAEmax	VAEmin	PVAE
VAE	1	46°	-26°	8°	3	25°	-25°	8°
	2	44°	-26°	9°	4	15°	-15°	8°

En la plataforma *Z2* el valor promedio del campo magnético no varía mucho en las cuatro zonas (entre un 10% y un 15%) según se muestra en la tabla 6.2. Esto es una primera indicación para pensar que no existe una anomalía de consideración como la que se vió en la plataforma *PI*. En la tabla 6.3 los valores del error de rumbo se mantienen prácticamente

constante en las cuatro zonas lo que indica que no debería existir ningún tipo de interferencia magnética en esta cubierta de vuelo. Como anteriormente se hizo para la plataforma *P1* se estudiará más detalladamente la zona *Z3* por ser la zona de influencia sobre los sensores magnéticos de los helicópteros.

En la tabla 6.4 se muestran los parámetros relacionados con la variación de la inducción magnética de la plataforma *P2* definidos en el capítulo 5. Estos parámetros son los siguientes:

- Gradiente extendido del promediado de todas las filas de la zona *Z3* del mapa magnético para cada una de las componentes para las componentes *X*, *Y* y *Z*, denominadas *GEPMX* (ecuación (5.11)), *GEPMY* (ecuación (5.12)) y *GEPMZ* (ecuación (5.13)), respectivamente en nanoTeslas por metro (nT/m).
- Gradiente extendido del promediado de todas las columnas de la zona *Z3* del mapa magnético para cada una de las componentes para las componentes *X*, *Y* y *Z*, denominadas *GEPCX* (ecuación (5.16)), *GEPCY* (ecuación (5.17)) y *GEPCZ* (ecuación (5.18)), respectivamente en nanoTeslas por metro (nT/m).
- Utilizando las curvas promedio por filas y por columnas de las componentes *X* e *Y*, se calculará el valor absoluto del promedio del error del rumbo de la Plataforma *GMPMF* (ecuación (5.20)) y *GMPMC* (ecuación (5.22)), respectivamente, en grados por metro (°/m).

Tabla 6.4. Valores de los parámetros *GE* (nT/m) y *GMP* (°/m) para las zona *Z3*.

Parámetro	Z3	Parámetro	Z3
<i>GEPMX</i>	855 nT/m	<i>GEPCX</i>	937 nT/m
<i>GEPMY</i>	414 nT/m	<i>GEPCY</i>	3.391 nT/m
<i>GEPMZ</i>	1.420 nT/m	<i>GEPCZ</i>	3.485 nT/m
<i>GMPMF</i>	10 °/m	<i>GMPMC</i>	6 °/m

Las curvas promedio por filas, por columnas y del error de rumbo para la zona *Z3* se muestran en la figura 6.15, 6.16 y 6.17, respectivamente. En los promedios por filas de cada una de las componentes se encontraría la influencia de un pequeño magnetismo transversal. Este se manifestaría por un máximo o mínimo de cierta consideración en la componente *X* y un máximo y un mínimo consecutivos en la componente *Z* cuyo punto de transición o inversión de pendiente se encuentra en el mismo punto que el máximo o mínimo de la componente *X* comentada. La componente *Y* en los promedios por filas no tiene relevancia. La figura 6.15 muestra que se aprecia una muy pequeña componente transversal a 7 metros del límite de babor del mapa magnético con un máximo local de 250 nT sobre el nivel de la curva.

En los promedios por columnas de cada una de las componentes se encontraría la influencia de un posible magnetismo longitudinal a 3,5 metros de la popa. La figura 6.16 muestra el promediado por columnas para las tres componentes.

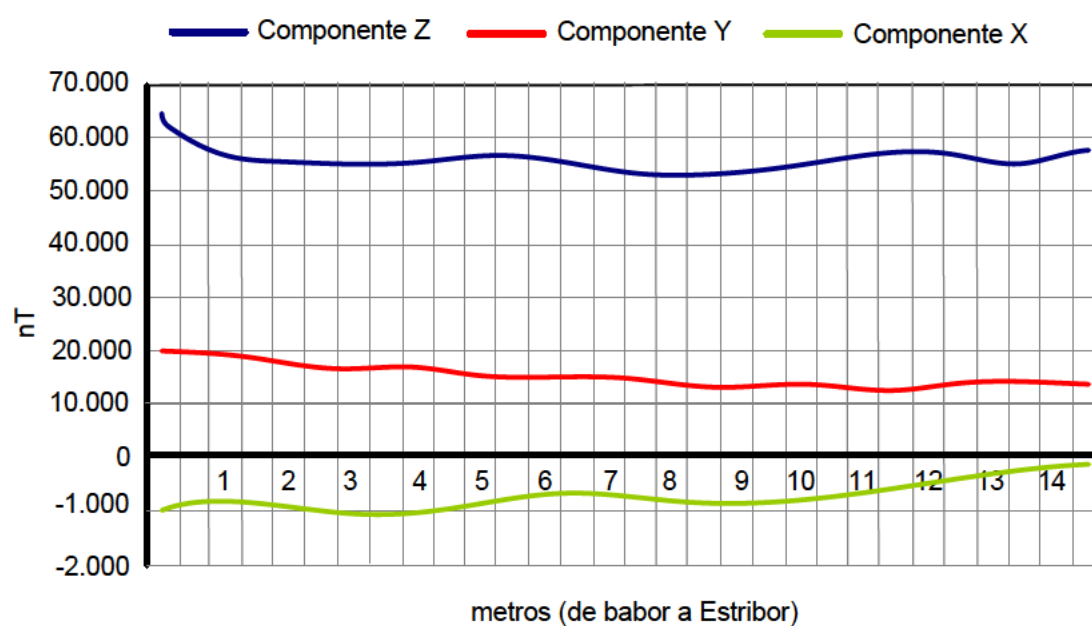


Figura 6.14. Promediado mapa magnético por filas plataforma P2.

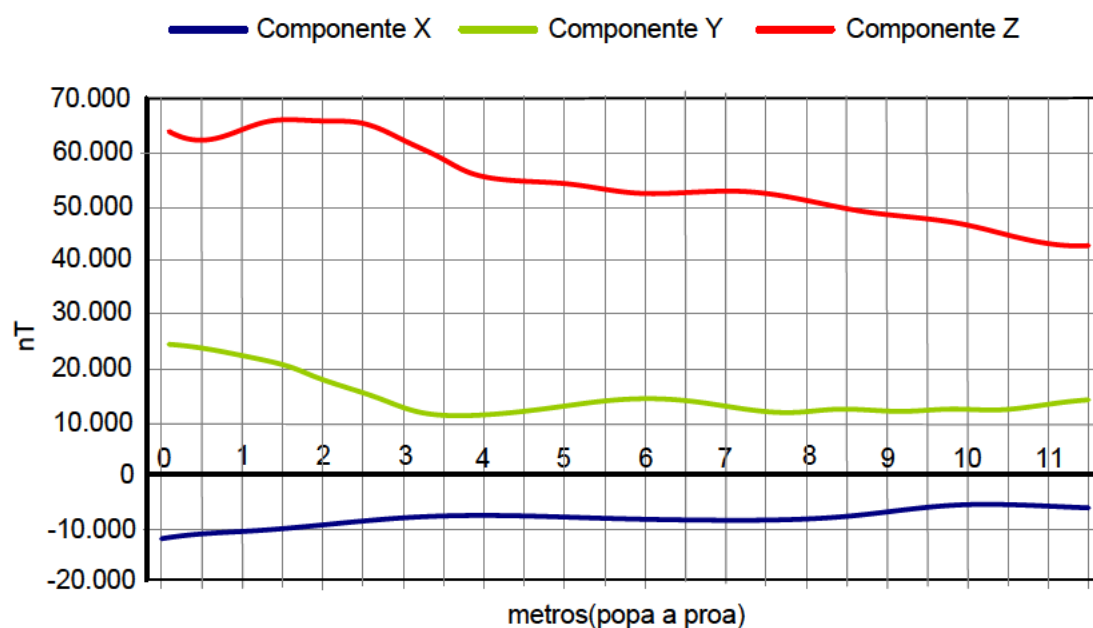


Figura 6.15. Promediado mapa magnético por columnas plataforma P2.

Una componente vertical importante no tiene efecto sobre una brújula u otro tipo de sensor magnético que utilice la componente horizontal del campo magnético existente para dar información del rumbo magnético. Por ello no vamos a considerar en este estudio la componente vertical del campo magnético.

Para calcular el error de rumbo por filas y por columnas se utilizan las componentes X e Y de los promedios por filas $GERPF(i)$ y por columnas $GERPC(j)$, según las ecuaciones (5.19) y (5.21), respectivamente. La figura 6.17 muestra las gráficas comentadas. En la zona de crujía (a 7 metros del lado de babor) el promediado por filas muestra un error de $2,5^\circ$. El promediado por columnas presenta un error de -8° a cuatro metros del extremo de popa del mapa magnético.

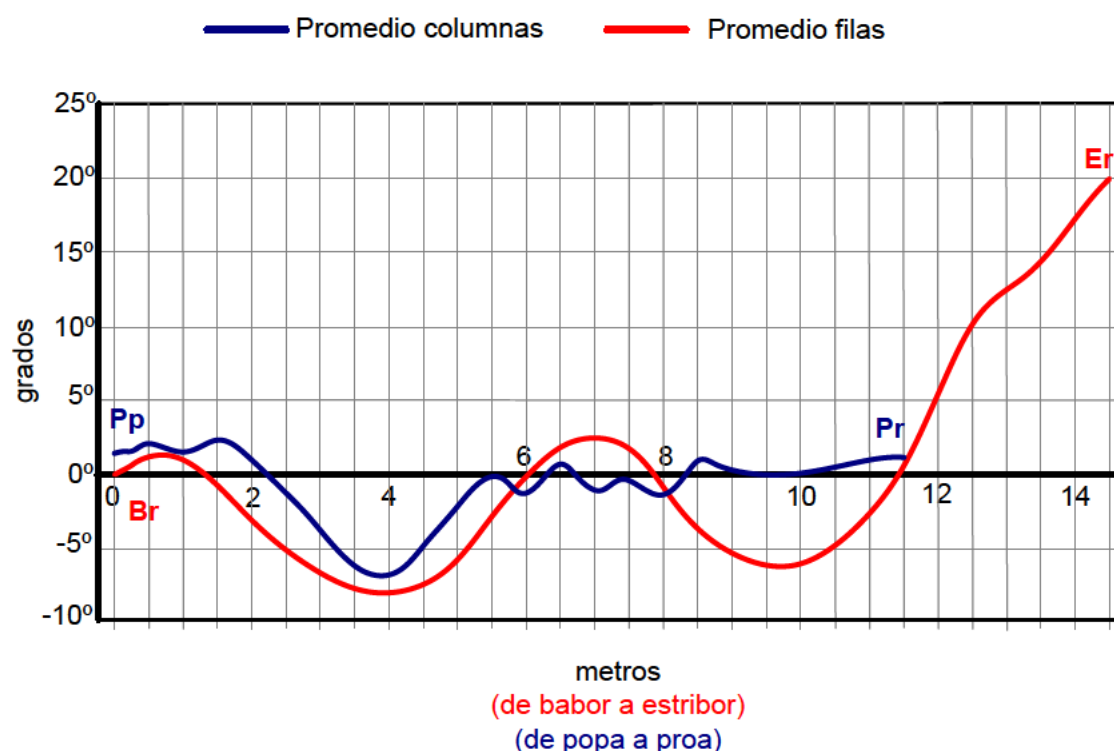


Figura 6.16. Error de Rumbo Promediado Plataforma P2.

6.5 Levantamiento de mapas magnéticos en Plataformas móviles

No siempre las plataformas o buques estarán en una posición fija. En este caso la diferencia fundamental con las Plataformas fijas es la existencia de un campo magnético variable producido por las magnetizaciones inducidas debidas al campo magnético de la Tierra existente en la zona de operación y al rumbo u orientación de la misma dentro de él.

La extracción de las componentes permanentes e inducidas horizontales se realizará levantando los mapas magnéticos a diferentes rumbos. La componente inducida vertical no nos importa porque no influye en el error de rumbo de la instrumentación.

En la siguiente ecuación se muestra que la densidad de flujo magnético medido en una zona H de la Tierra y a un rumbo θ es la combinación de la debida al Campo Magnético Terrestre y la producida por la propia plataforma.

$$\vec{B}_M^{H,\theta}(x, y, z) = \vec{B}_T^H(x, y, z) + \vec{B}_P^{H,\theta}(x, y, z) \quad (6.7)$$

$\vec{B}_M^{H,\theta}$ es la densidad de flujo magnético terrestre medida en la Plataforma en una zona H y con una orientación θ . \vec{B}_T^H es la densidad de flujo magnético del campo magnético terrestre en la zona H . $\vec{B}_P^{H,\theta}$ es la densidad de flujo magnético debida a las magnetizaciones propias de la Plataforma en una zona H y con una orientación θ .

La densidad de flujo magnético producida por la plataforma se forma por la contribución de las magnetizaciones permanentes e inducidas. Se debe tener en cuenta que las componentes inducidas dependen del Campo Magnético Terrestre en la zona H y del rumbo correspondiente.

$$\vec{B}_P^{H,\theta}(x, y, z) = \vec{B}_{P,p}^{H,\theta}(x, y, z) + \vec{B}_{P,i}^{H,\theta}(x, y, z) \quad (6.8)$$

Dónde $\vec{B}_{P,p}^{H,\theta}$ es la densidad de flujo magnético debida a las magnetizaciones propias permanentes de la Plataforma en una zona H y con una orientación θ . $\vec{B}_{P,i}^{H,\theta}$ es la densidad de flujo magnético debida a las magnetizaciones propias inducidas de la Plataforma en una zona H y con una orientación θ .

La densidad de flujo magnético debida a las magnetizaciones permanentes es constante en el sistema de referencia de la plataforma y todas tienen influencia en cada una de las componentes vectoriales.

$$\begin{aligned} \vec{B}_{P,p}^{H,\theta}(x, y, z) &= (B_{P,px}^{H,\theta}, B_{P,py}^{H,\theta}, B_{P,pz}^{H,\theta}) \\ B_{P,px}^{H,\theta} &= B_{MVPx} + B_{MLPx} + B_{MTPx} \\ B_{P,py}^{H,\theta} &= B_{MVPy} + B_{MLPy} + B_{MTPy} \\ B_{P,pz}^{H,\theta} &= B_{MVPz} + B_{MLPz} + B_{MTPz} \end{aligned} \quad (6.9)$$

La densidad de flujo magnético debida a las magnetizaciones inducidas tiene una componente que depende del Campo Magnético de la Tierra en la zona de operación H y otra componente dependiente del rumbo.

$$\begin{aligned}
 \vec{B}_{P,i}^{H,\theta}(x, y, z) &= (B_{P,ix}^{H,\theta}, B_{P,iy}^{H,\theta}, B_{P,pz}^{H,\theta}) \\
 B_{P,ix}^{H,\theta} &= B_{MVIx}^H + B_{MLIx}^H \cdot \cos \theta + B_{MTIx}^H \cdot \sin \theta \\
 B_{P,iy}^{H,\theta} &= B_{MVIy}^H + B_{MLIy}^H \cdot \cos \theta + B_{MTIy}^H \cdot \sin \theta \\
 B_{P,pz}^{H,\theta} &= B_{MVIx}^H + B_{MLIy}^H \cdot \cos \theta + B_{MTIy}^H \cdot \sin \theta
 \end{aligned} \tag{6.10}$$

Para los cuatro rumbos cardinales las componentes inducidas simplifican las ecuaciones anteriores, quedando de la siguiente manera:

$\theta_1 = 0^\circ$ (Rumbo Norte)

$$\begin{aligned}
 B_{P,ix}^{H,0} &= B_{MVIx}^H + B_{MLIx}^H \\
 B_{P,iy}^{H,0} &= B_{MVIy}^H + B_{MLIy}^H \\
 B_{P,pz}^{H,0} &= B_{MVIx}^H + B_{MLIy}^H
 \end{aligned} \tag{6.11}$$

$\theta_2 = 180^\circ$ (Rumbo Sur)

$$\begin{aligned}
 B_{P,ix}^{H,180^\circ} &= B_{MVIx}^H - B_{MLIx}^H \\
 B_{P,iy}^{H,180^\circ} &= B_{MVIy}^H - B_{MLIy}^H \\
 B_{P,pz}^{H,180^\circ} &= B_{MVIx}^H - B_{MLIy}^H
 \end{aligned} \tag{6.12}$$

$\theta_3 = 90^\circ$ (Rumbo Este)

$$\begin{aligned}
 B_{P,ix}^{H,90} &= B_{MVIx}^H + B_{MTIx}^H \\
 B_{P,iy}^{H,90} &= B_{MVIy}^H + B_{MTIy}^H \\
 B_{P,pz}^{H,90} &= B_{MVIx}^H + B_{MTIy}^H
 \end{aligned} \tag{6.13}$$

$\theta_4 = 270^\circ$ (Rumbo Oeste)

$$\begin{aligned}
 B_{P,ix}^{H,270} &= B_{MVIx}^H - B_{MTIx}^H \\
 B_{P,iy}^{H,270} &= B_{MVIy}^H - B_{MTIy}^H \\
 B_{P,pz}^{H,270} &= B_{MVIx}^H - B_{MTIy}^H
 \end{aligned} \tag{6.14}$$

Se elegirán dos rumbos opuestos para eliminar componentes inducidas. Aunque en una situación real las componentes inducidas no son lo suficientemente importantes como para tenerlas en cuenta, vamos a eliminarlas de nuestro estudio. Compensarlas implicaría que la anomalía se propagaría a otro de los rumbos. En nuestro caso al haber estudiado siempre el norte se tomará el sur para eliminar las componentes inducidas.

6.5.1. Mapa Magnético permanente de la Plataforma P3

Esta plataforma tiene las siguientes características:

- Descripción: Zona de aterrizaje de helicópteros.
- Dimensiones: 14,5 x 11,5 m².
- Orientación: 360° geográficos. La orientación del helicóptero sobre la cubierta es con la proa apuntando al rumbo comentado.
- Material: acero naval.

De esta Plataforma se levantaron cuatro mapas magnéticos, uno a cada rumbo cardinal. El mapa magnético permanente se ha extraído de los mapas Norte y Sur.

En el mapa permanente resultante de la combinación de los rumbos Norte y Sur, según se comentó en el apartado anterior, se han marcado el tipo de dipolos que posiblemente sean los causantes de la anomalía magnética en las zonas donde aparecen. Unos dipolos de esas características son capaces de compensar esa variación de campo, por lo tanto, dichos dipolos pueden ser bobinas diseñadas para que produzcan el efecto compensatorio en el área de influencia. Estas bobinas son diferentes a las de *degaussing*, mucho más pequeñas y localizadas sólo en el área de corrección de la anomalía. La solución de instalación de pequeñas bobinas en el entorno de la zona dónde se quiere compensar una magnetización será la que se propondrá en el capítulo 7.

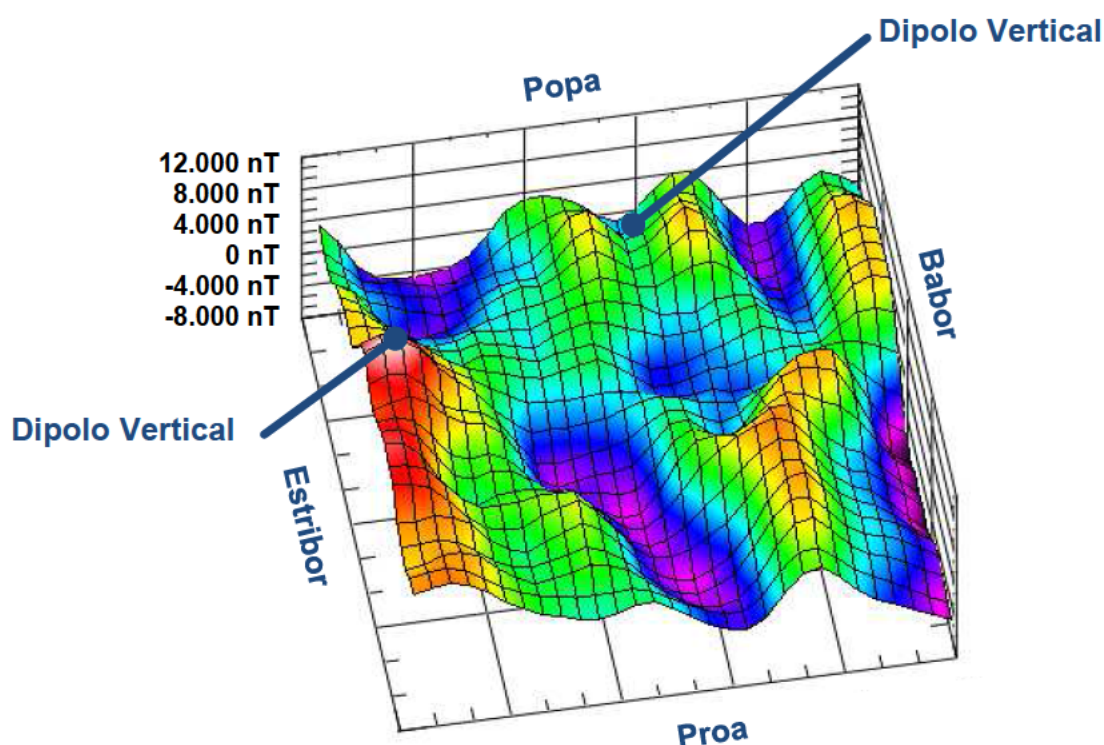


Figura 6.17. Componente transversal campo magnético plataforma P3.

La figura 6.17 muestra la componente transversal del campo magnético medido en la cubierta de vuelo. En la zona de popa se han localizado dos dipolos verticales de pequeña magnitud aunque esta distribución de campo puede estar producida por otra combinación de dipolos. El resto de dipolos que aparecen no se han tenido en cuenta ya que están muy alejados de la zona de interés (zona Z3, ver figura 5.12).

La componente longitudinal del mapa magnético (eje Y de los magnetómetros; figura 6.18) presenta un claro dipolo longitudinal en el punto (17.5, 5.5) (en metros (8.75, 2.75)). En principio, este dipolo podría tener una cierta influencia en los sensores de rumbo del helicóptero por la situación de éste en la cubierta de vuelo. Existe otro dipolo longitudinal de menor magnitud en el punto (16,15) (en metros (7.5, 7)) pero que puede tener mayor influencia que el anterior en los errores de rumbo.

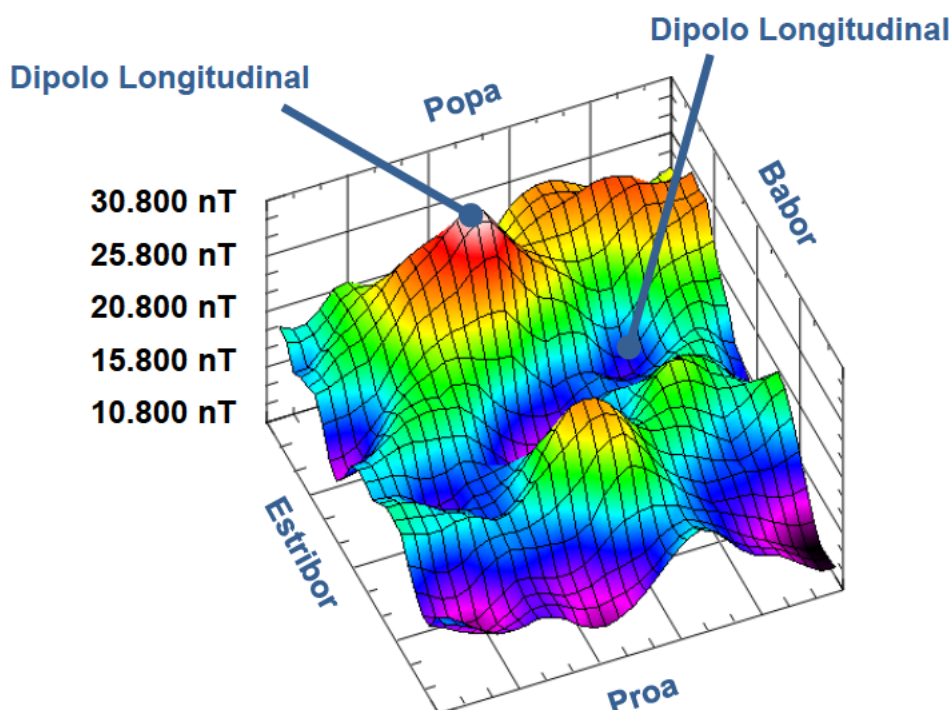


Figura 6.18. Componente longitudinal del campo magnético en la plataforma P3.

La componente vertical del mapa magnético (eje Z de los magnetómetros; figura 6.19) presenta dos dipolos longitudinales en los puntos (17.5, 6) y (15,13) y uno vertical en el punto (8,5). El efecto de estos dipolos visto desde la componente vertical es una función impar en la dirección longitudinal o transversal, respectivamente, como se comentó en el capítulo 2.

En los tres mapas presentados de la plataforma P3 no existen unos dipolos claramente diferenciados en las tres componentes lo que es coherente con el pequeño error de rumbo detectado con la brújula sobre la cubierta de vuelo.

Las componentes transversal y longitudinal nos permiten calcular el rumbo que mediría un sensor situado a 1 metro. Teniendo en cuenta la declinación magnética de la zona de la Tierra el día de la medida [25], se utilizará la ecuación (5.1) para calcular el error de rumbo.

La plataforma *P3* estaba el día de las medidas en las coordenadas geográficas $43^{\circ} 28' 34,13''$ N y $8^{\circ} 14' 25,49''$ O, a un rumbo geográfico de 360° (*RGeográfico*) y una declinación magnética (*DMagnética*) de $-5,2^{\circ}$ (Oeste) [25].

Teniendo en cuenta la zona de la interferencia marcada en la figura 6.20, el error de rumbo es inferior a 10° .

Para visualizar las posiciones y valores de las zonas de estudio de los mapas magnéticos de la plataforma *P3* se adjuntan los mismos vistos sobre la cubierta de vuelo en dos dimensiones (figuras 6.21, 6.22, 6.23 y 6.24).

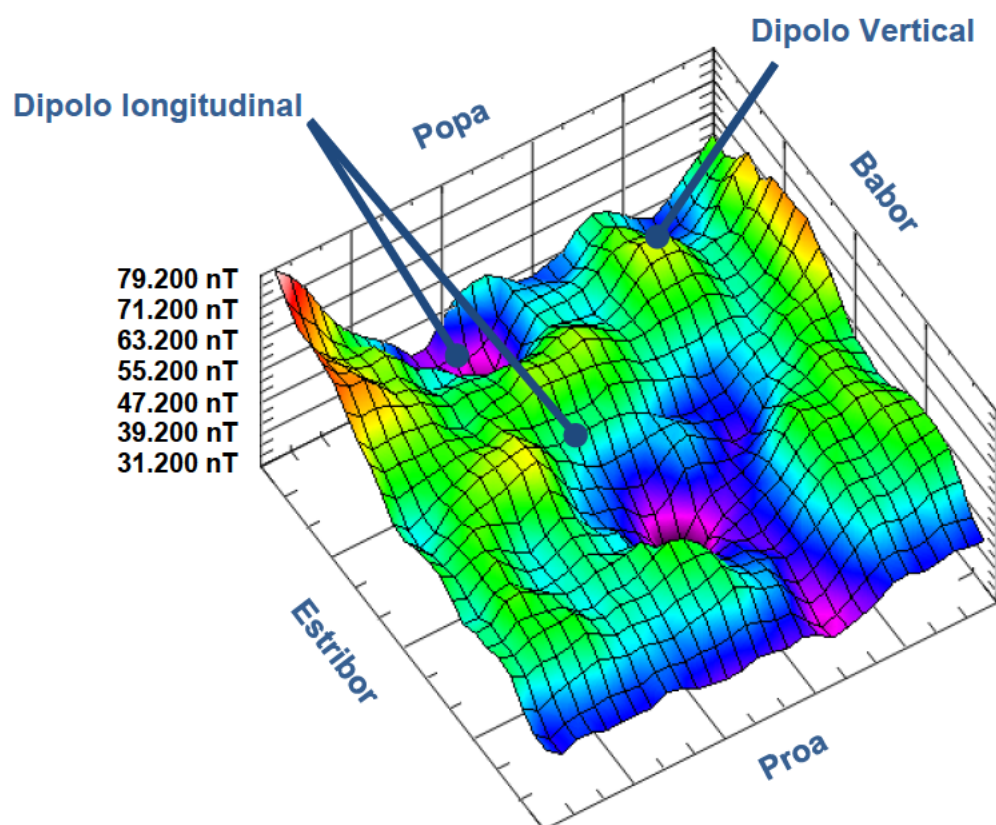


Figura 6.19. Componente vertical del campo magnético en la plataforma *P3*.

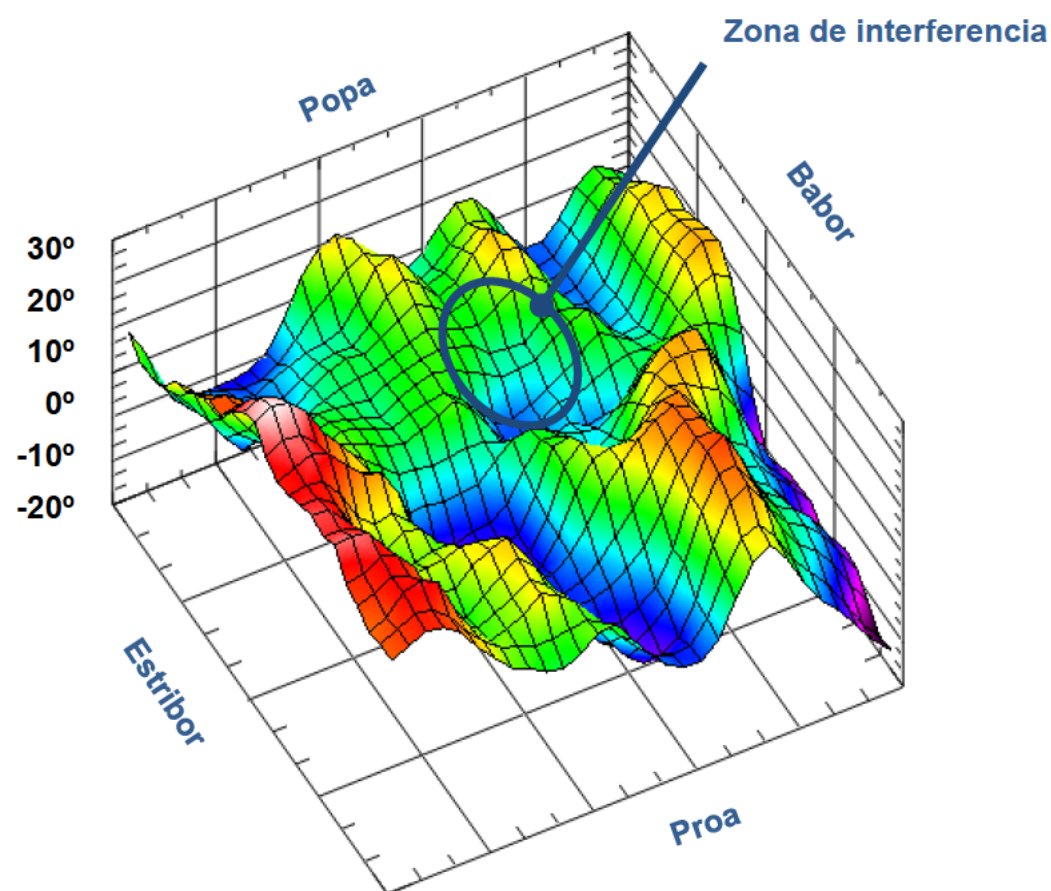


Figura 6.20. Error rumbo en la plataforma P3.

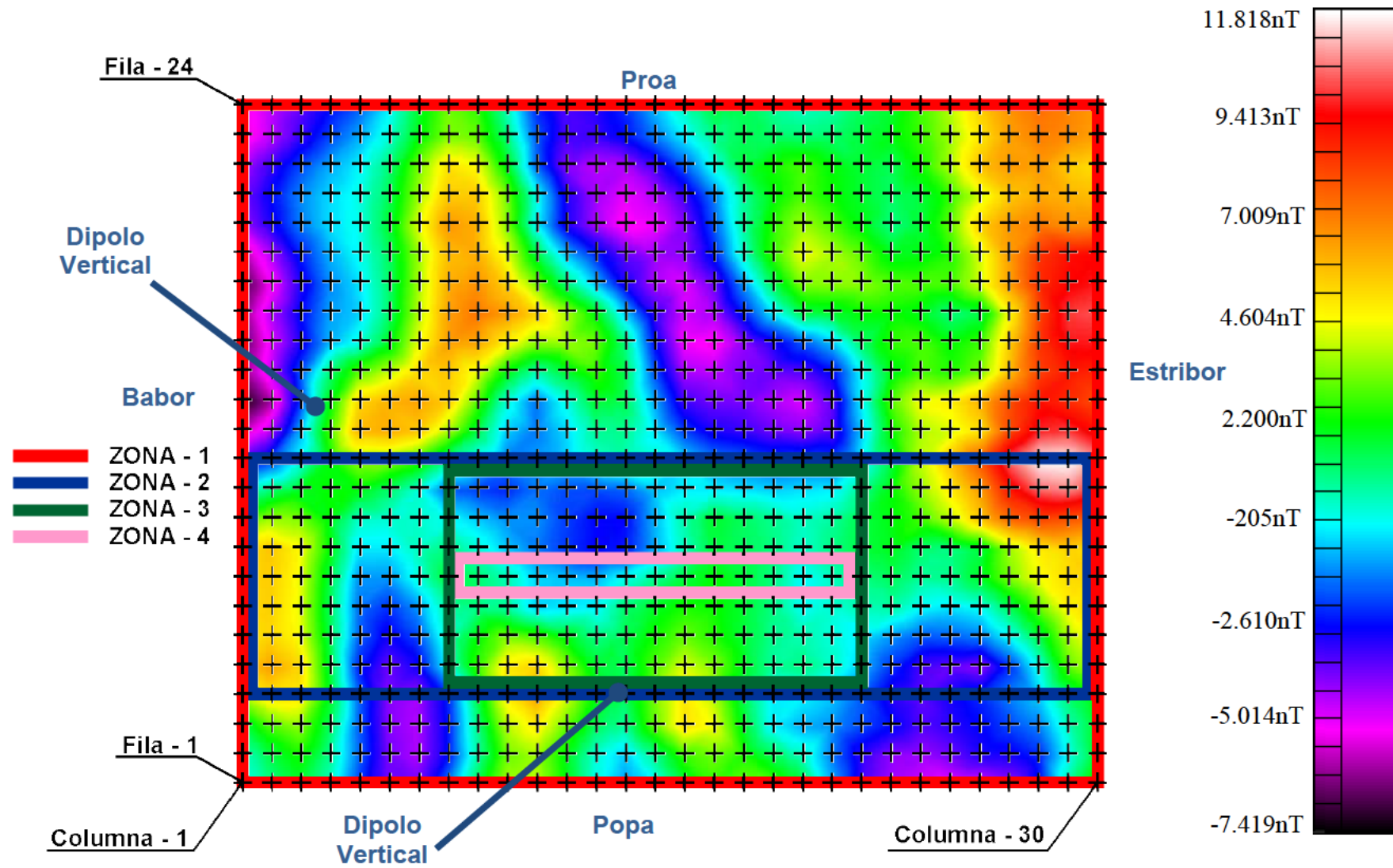


Figura 6.21. Zonas de estudio de la componente magnética transversal en la plataforma P3.

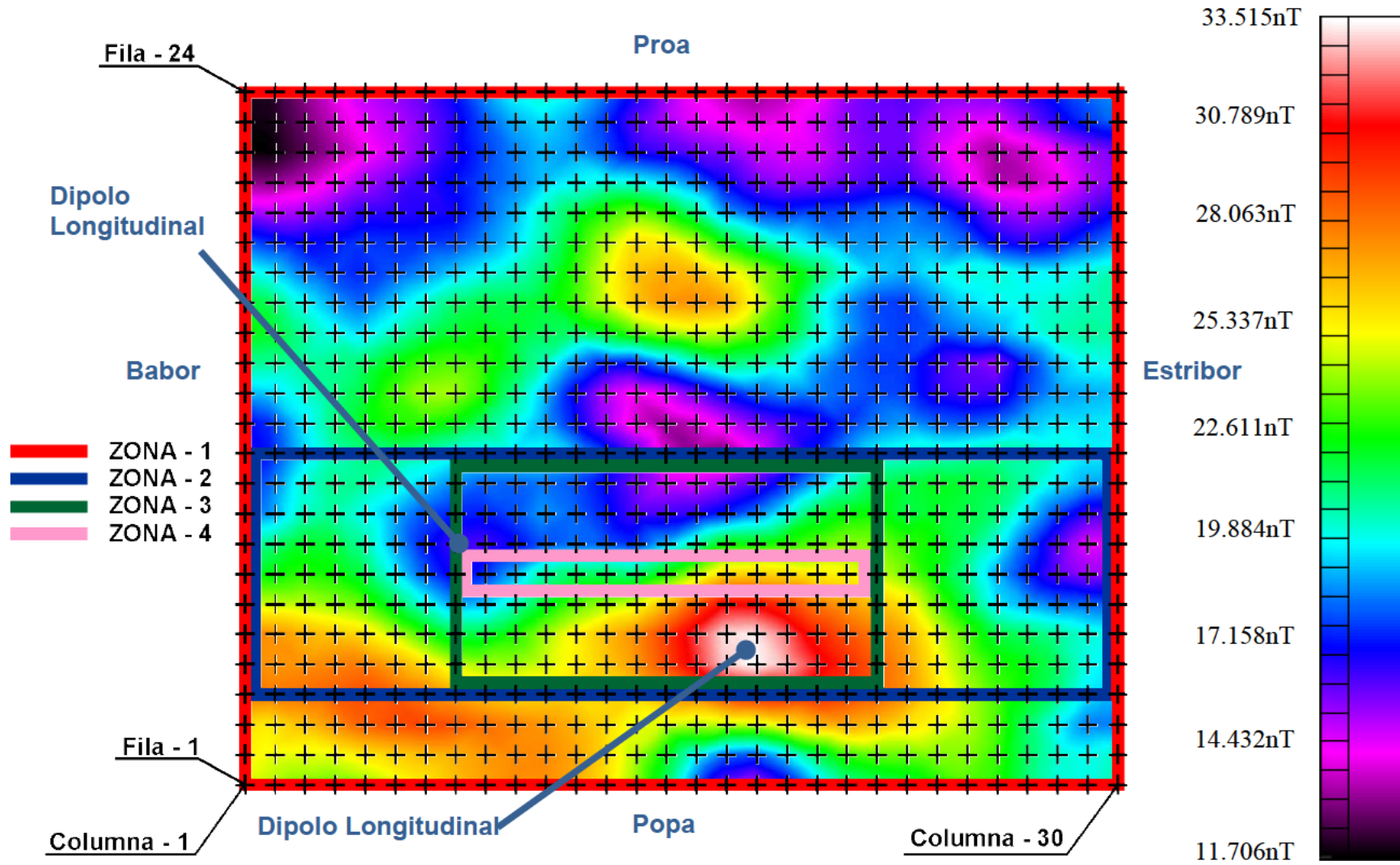


Figura 6.22. Zonas de estudio de la componente magnética longitudinal en la plataforma P3.

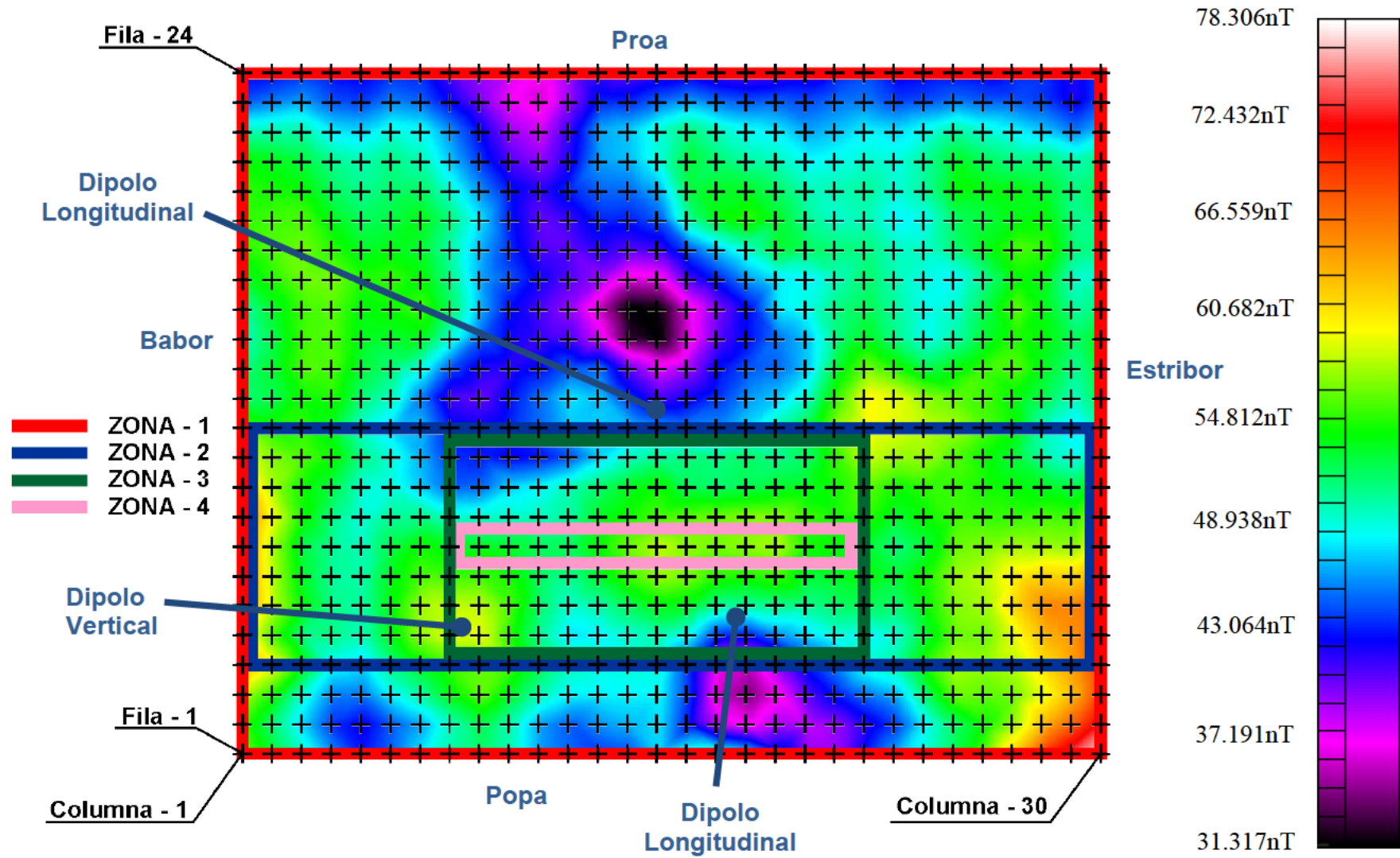


Figura 6.23. Zonas de estudio de la componente magnética vertical en la plataforma P3.

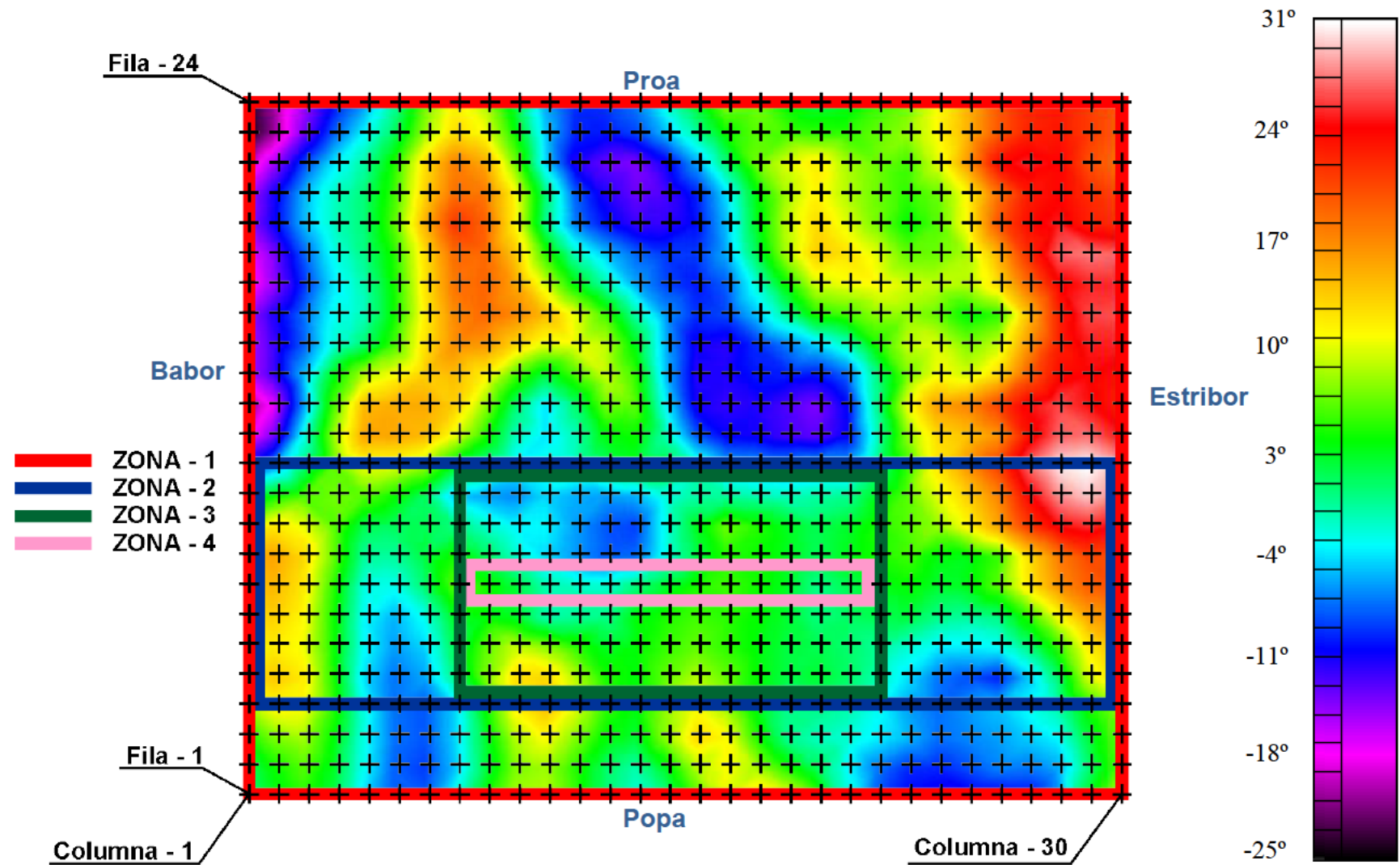


Figura 6.24. Zonas de estudio del error de rumbo en la plataforma P3.

6.5.2. Análisis de resultados

Al igual que se hizo para las anteriores plataformas se van a establecer los valores de los parámetros V_{MAX} , V_{MIN} , V_{PRO} , VA_{Emax} , VA_{Emin} y $PVAE$ calculados según las ecuaciones (5.2), (5.3), (5.4), (5.6), (5.7) y (5.8), respectivamente. Las tablas 6.5 y 6.6 muestran los valores para las cuatro zonas establecidas.

Tabla 6.5. Valores máximo, mínimo y promedio de la densidad de flujo magnético.

X,Y,Z	Zona	V_{MAX}	V_{MIN}	V_{PRO}	Zona	V_{MAX}	V_{MIN}	V_{PRO}
X	1	11.818	-7.419	1.202	3	6.249	-2.996	598
	2	11.818	-4.147	1.447	4	2.202	-854	632
Y	1	33.515	11.706	20.652	3	33.515	12.971	22.970
	2	33.515	12.971	22.371	4	26.193	17.003	22.624
Z	1	78.306	31.317	50.790	3	60.707	35.876	52.041
	2	71.005	35.876	54.102	4	59.135	52.783	55.685

Tabla 6.6. Valores máximo, mínimo y promedio del error de rumbo en grados.

Parámetro	Zona	VA_{Emax}	VA_{Emin}	$PVAE$
VAE	1	31°	-25°	3°
	2	31°	-19°	4°
	3	13°	-13°	1°
	4	5°	-2°	2°

La tabla 6.7 muestra los parámetros que nos dan una idea global de las variaciones de campo entre los máximos y los mínimos locales en la zona Z3, $GEPFX$ (ecuación (5.11)), $GEPFY$ (ecuación (5.12)) y $GEPFZ$ (ecuación (5.13)), $GEPCX$ (ecuación (5.16)), $GEPCY$ (ecuación (5.17)) y $GEPCZ$ (ecuación (5.18)), $GMERPF$ (ecuación (5.20)) y $GMERPC$ (ecuación (5.22)).

Tabla 6.7. Valores de los parámetros $GEPF$, $GEPC$, $GMERPF$ y $GMERFC$ para la zona Z3.

$GEPFX$	1.480 nT/m	$GEPCX$	918 nT/m
$GEPFY$	850 nT/m	$GEPCY$	3.084 nT/m
$GEPFZ$	1.223 nT/m	$GEPCZ$	3.639 nT/m
$GMERPF$	4°/m	$GMERPC$	2°/m

Las curvas promedio por filas, por columnas y del error de rumbo para la zona Z3 se muestran a continuación. En estas curvas se destaca el menor gradiente respecto a las otras Plataformas medidas de la serie como se verá posteriormente en el estudio comparativo.

En los promedios por filas de cada una de las componentes (figura 6.25) no se aprecian variaciones que evidencien la existencia de dipolos que puedan producir errores de rumbo en los sensores.

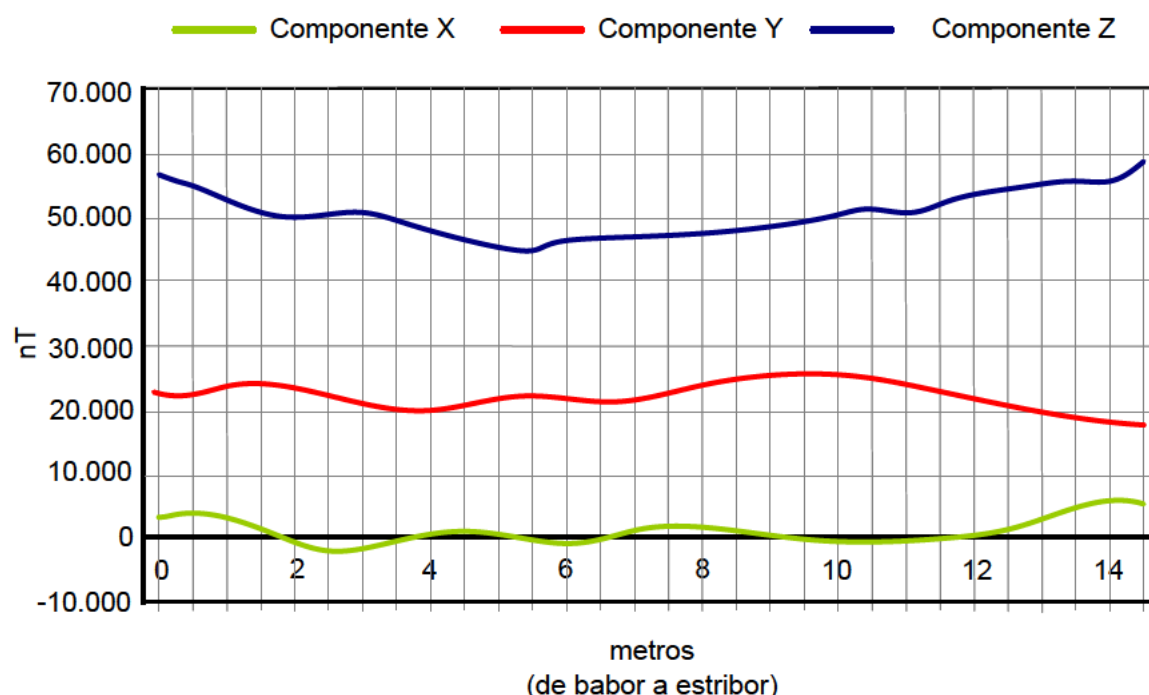


Figura 6.25. Promediado Mapa Magnético por Filas a Rumbo 360°.

En los promedios por columnas de cada una de las componentes (figura 6.26) se encontraría la influencia de un dipolo vertical. Este se manifestaría por un máximo en el punto 3,5. Dicho dipolo no tendría ninguna influencia sobre los sensores de rumbo. Una componente vertical importante no tiene efecto sobre una brújula u otro tipo de sensor magnético que utilice la componente horizontal del campo magnético existente para dar información del rumbo magnético.

Por otro lado, con las componentes X e Y de los promedios por filas y columnas se calcula el valor del error de rumbo utilizando las expresiones 5.19 y 5.21 para el promedio por filas y el promedio por columnas, respectivamente. Como se aprecia en la figura 6.27 el error de rumbo en la dirección popa a proa entre 4 y 7 metros es inferior a 3° y en la dirección babor a estribor entre 5 y 7 metros es inferior a 4°.

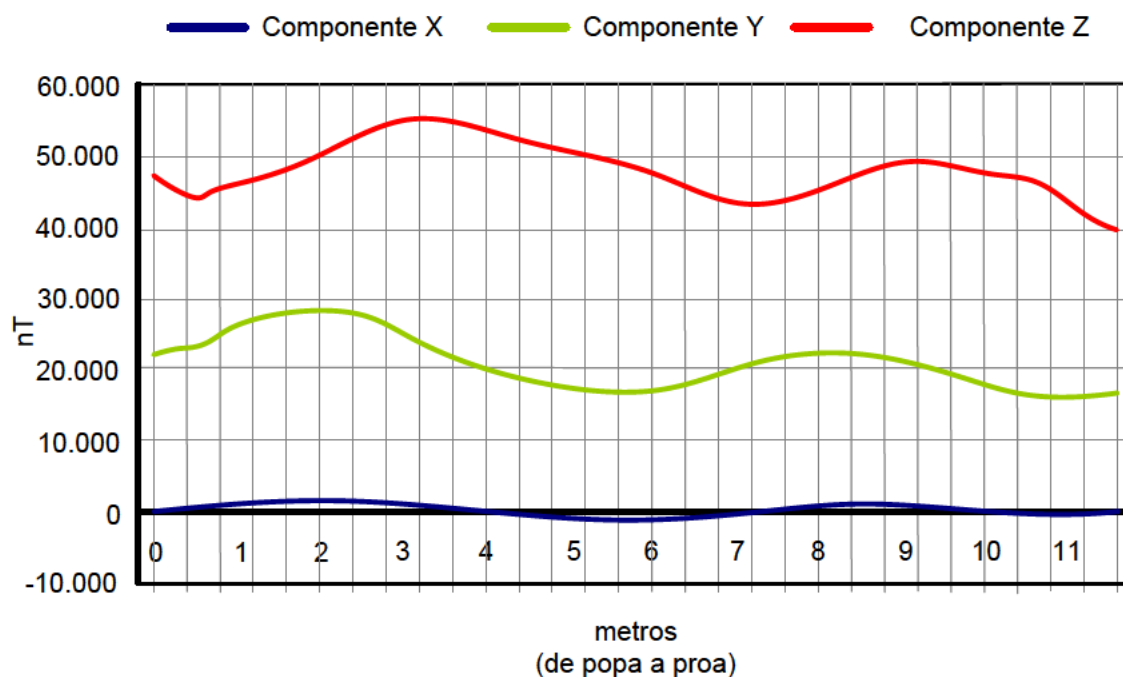


Figura 6.26. Promediado Mapa Magnético por Columnas a Rumbo 360°.

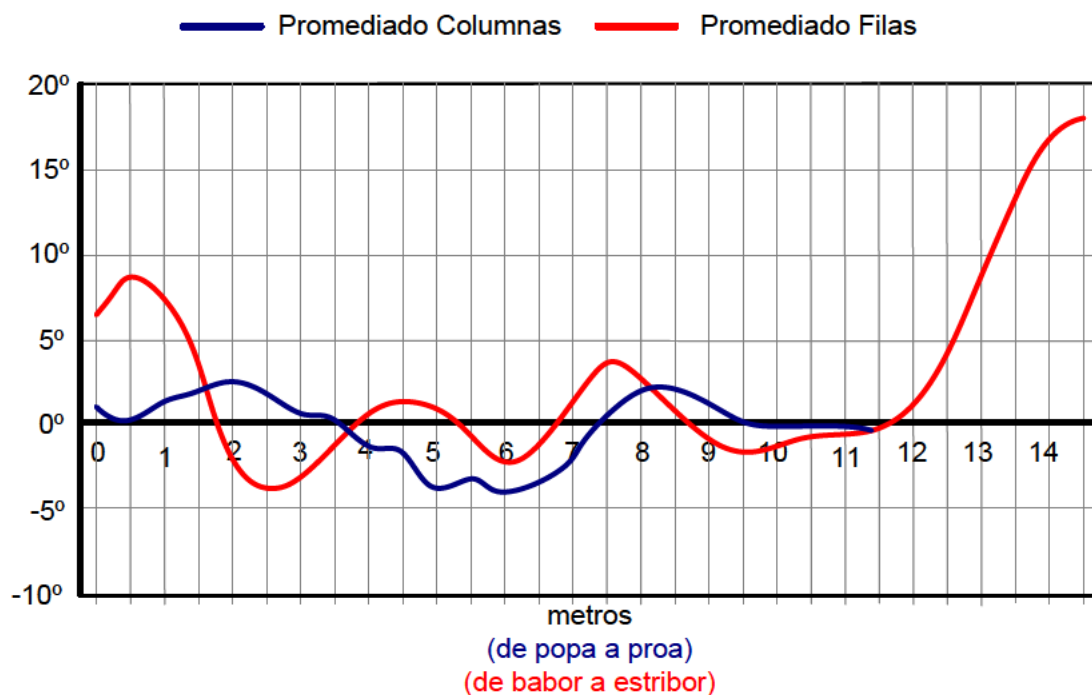


Figura 6.27. Error de Rumbo Promediado a Rumbo 360°.

6.6 Mapa Magnético permanente de la plataforma P4

Esta plataforma representa al cuarto buque de la serie de la misma clase. Es importante hacer el estudio en todos los buques de la serie para determinar las causas de las anomalías que se detecten y las posibles acciones a tomar durante la construcción del mismo para controlar su evolución. La plataforma P4 tiene las siguientes características:

- Descripción: Zona de aterrizaje de helicópteros.
- Dimensiones: $14,5 \times 11,5 \text{ m}^2$.
- Orientación: 360° geográficos. La orientación del helicóptero sobre la cubierta es con la proa apuntando al rumbo comentado.
- Material: acero naval.

De esta Plataforma se levantaron cuatro mapas magnéticos, uno a cada rumbo cardinal. El mapa magnético inducido se ha extraído de los mapas Norte y Sur.

En el mapa permanente resultante de la combinación de los rumbos Norte y Sur, según se comentó en el apartado anterior, se han marcado el tipo de dipolos que posiblemente sean los causantes de la anomalía magnética en las zonas donde aparecen. Lo que se pretende decir es que dipolos de esas características son capaces de compensar esa variación de campo; dichos dipolos pueden ser bobinas diseñadas para que produzcan el efecto compensatorio en el área de influencia.

La figura 6.28 muestra la componente transversal del campo magnético medido en la cubierta de vuelo. En la zona medida se ha localizado el efecto de dos dipolos transversales en los puntos (9.75, 10.75) y (5.25, 2.75) en puntos de muestreo del mallado. La conversión a puntos es sencilla ya que el muestreo de puntos se ha realizado cada medio metro, tanto en filas como en columnas. Por lo tanto, el punto 0 correspondería a 0 metros, sería el punto 1 a 0,5 metros y el punto n , correspondería a la distancia $0,5.n+1$ metros.

En la componente longitudinal (figura 6.29) la magnetización transversal no se aprecia mucho debido a una pequeña magnetización longitudinal en la posición (5.5, 7.75). La componente vertical del campo magnético (figura 6.30) vuelve a mostrar los dos dipolos transversales que se apreciaban con claridad en la componente transversal.

El error de rumbo magnético (figura 6.31) se ha calculado utilizando las componentes X e Y para cada uno de los puntos medidos. Según los resultados obtenidos en la zona de influencia de la anomalía magnética oscilan entre 0° y 25° . Esta Plataforma estaba el día de las medidas en las coordenadas geográficas $37^\circ 33' 26'' \text{ N}$ y $1^\circ 18' 21'' \text{ O}$, a un rumbo geográfico de 360° (*RGeográfico*) y una declinación magnética (*DMagnética*) de $-1,17^\circ$ (Oeste) [25].

Otra forma de visualizar los datos magnéticos medidos es utilizando mapas en dos dimensiones de la cubierta de vuelo. De esta manera se puede precisar con exactitud los dipolos detectados. Las figuras 6.32, 6.33, 6.34 y 6.35 muestran los mapas magnéticos de la componente transversal, longitudinal, vertical y error de rumbo magnético de la cubierta de vuelo de la plataforma P4, respectivamente.

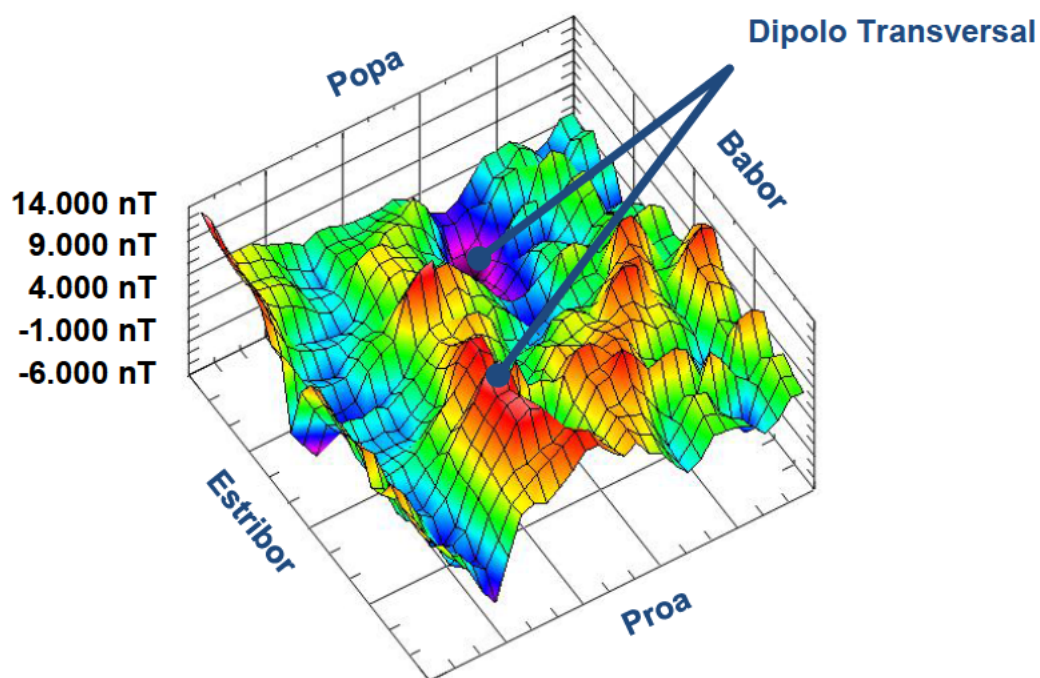


Figura 6.28. Componente transversal del campo magnético en la plataforma P4.

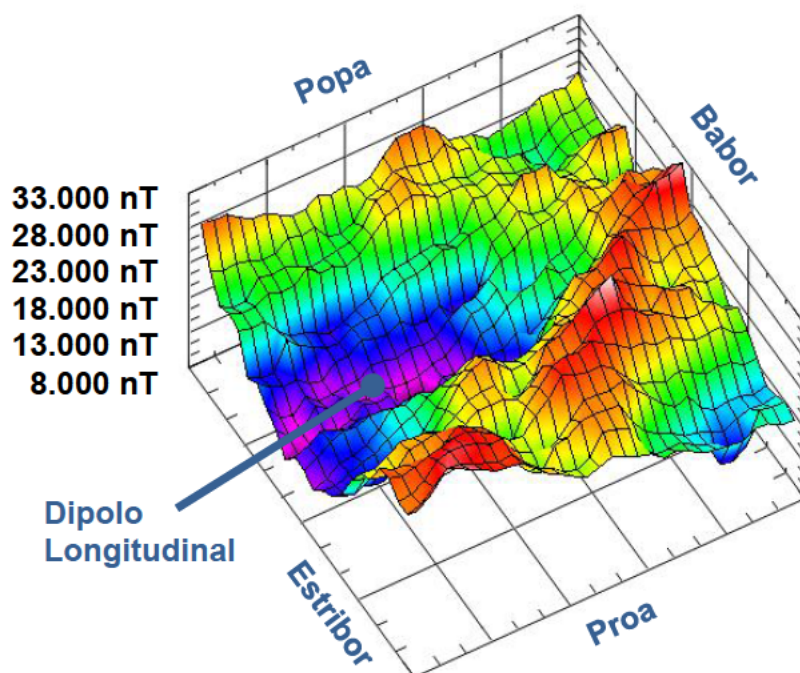


Figura 6.29. Componente longitudinal del campo magnético en la plataforma P4.

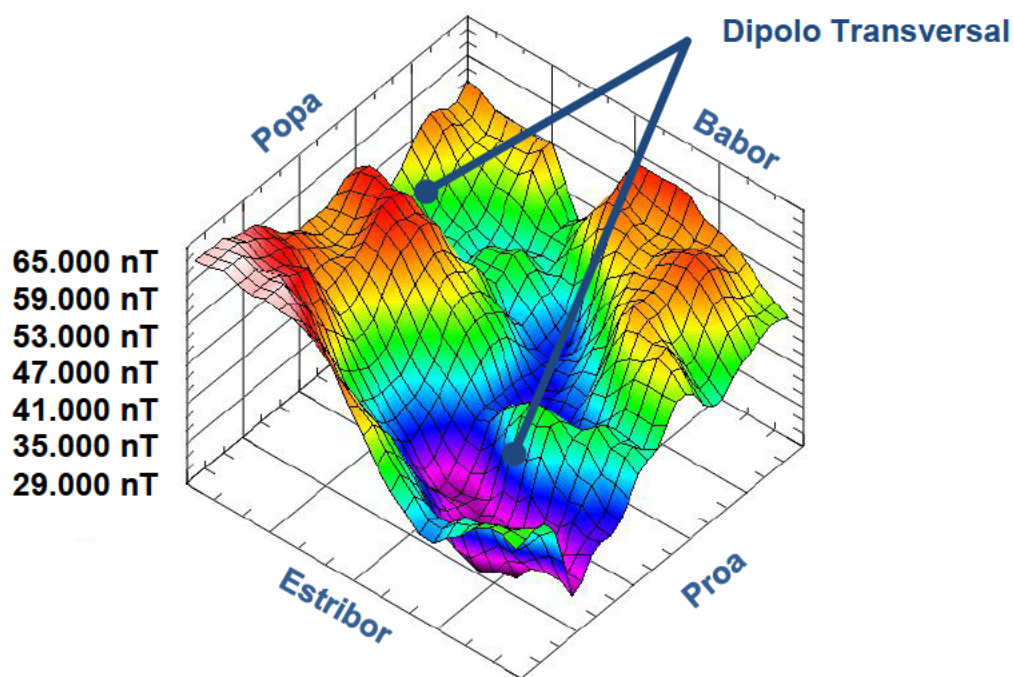


Figura 6.30. Componente vertical del campo magnético en la plataforma *P4*.

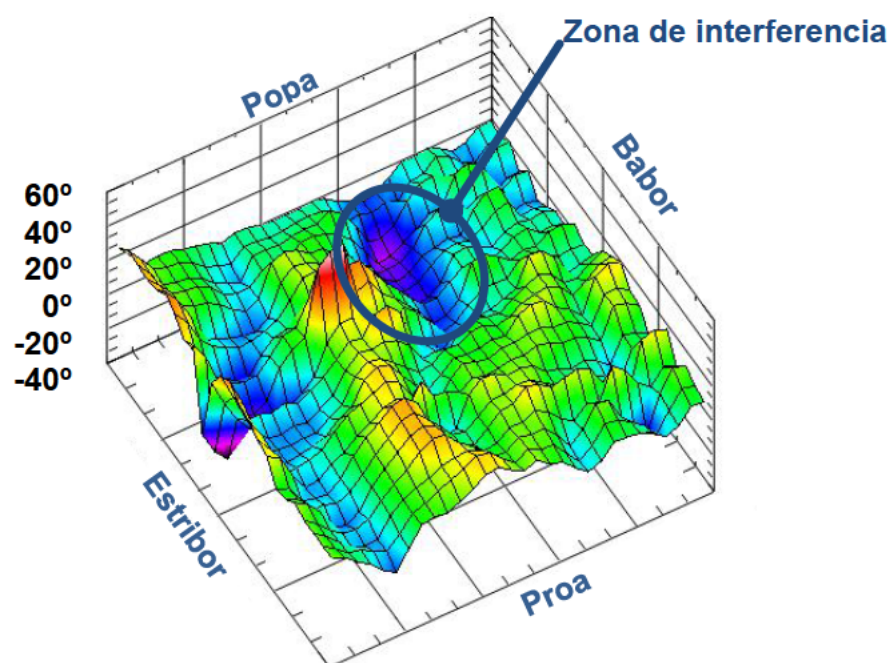


Figura 6.31. Error de rumbo en la plataforma.

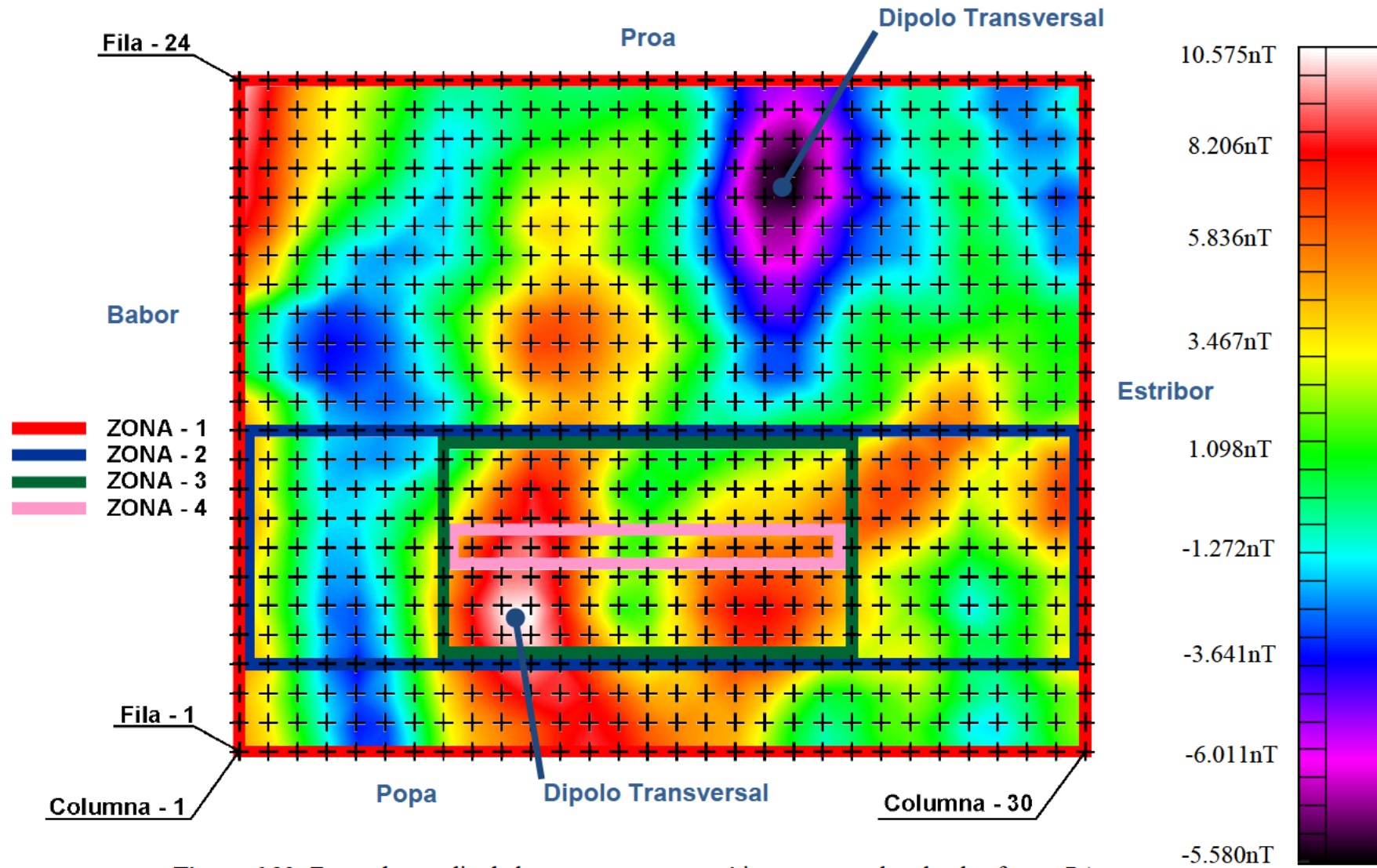


Figura 6.32. Zonas de estudio de la componente magnética transversal en la plataforma P4.

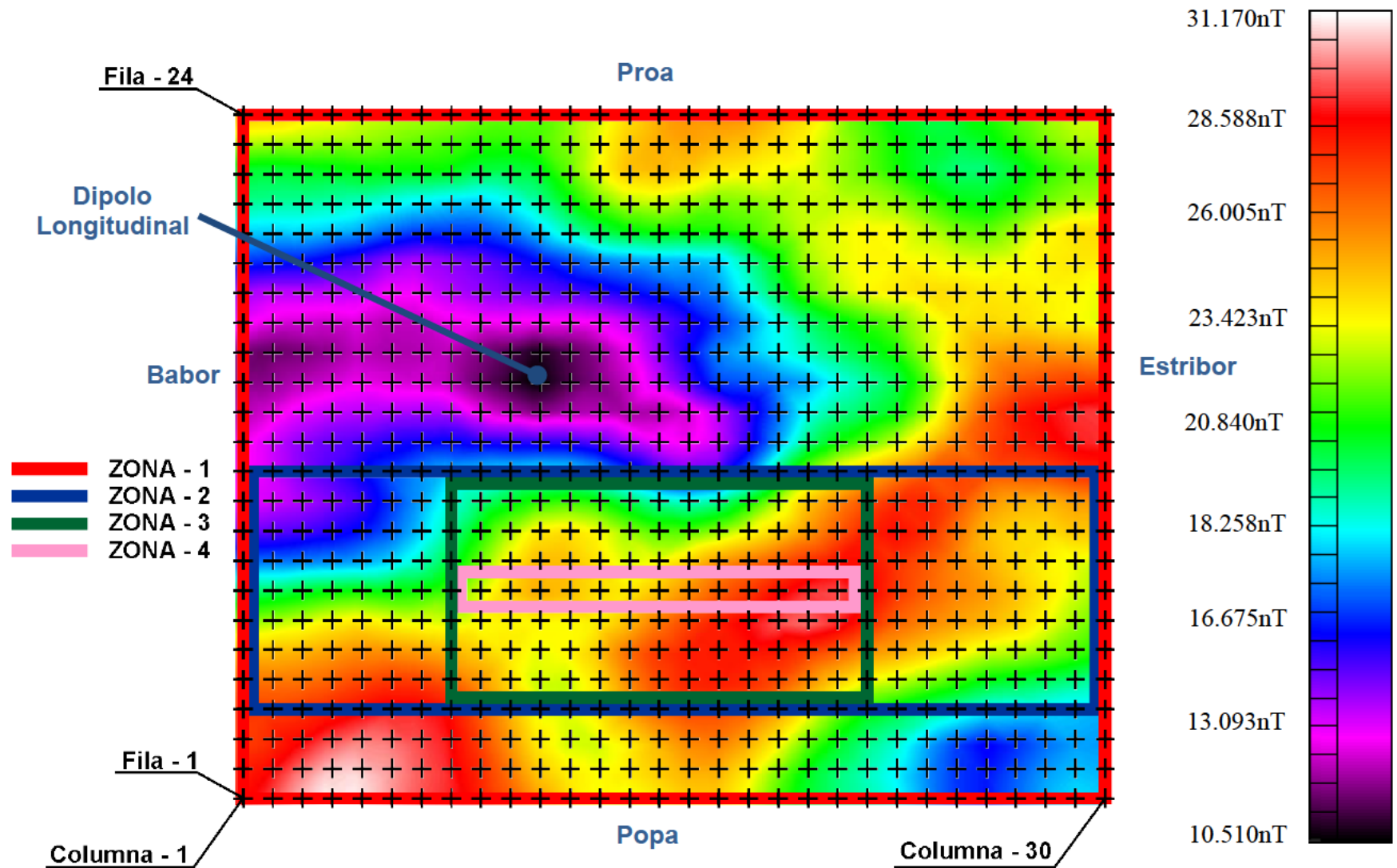


Figura 6.33. Zonas de estudio de la componente magnética longitudinal en la plataforma P4.

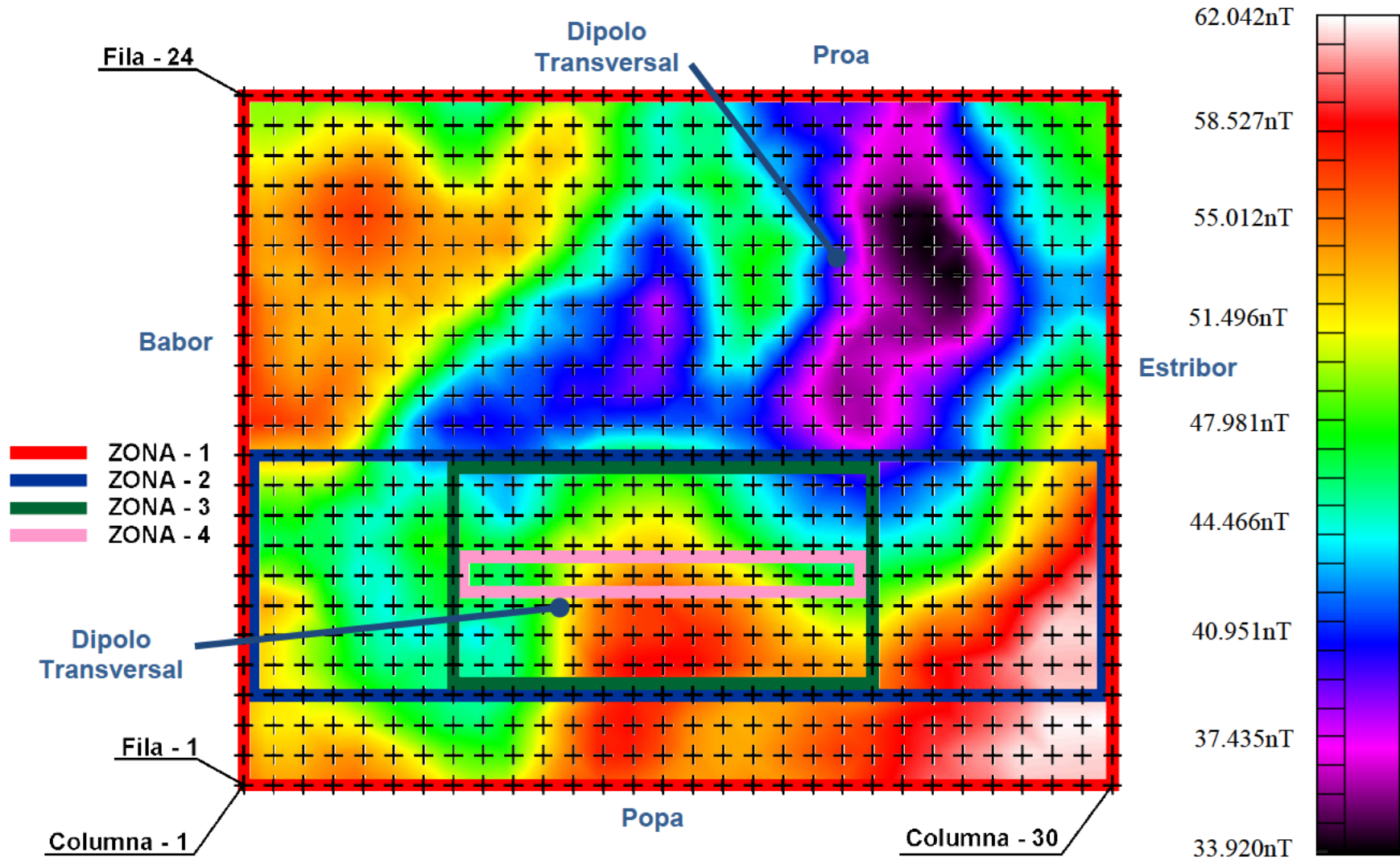


Figura 6.34. Zonas de estudio de la componente magnética vertical en la plataforma P4.

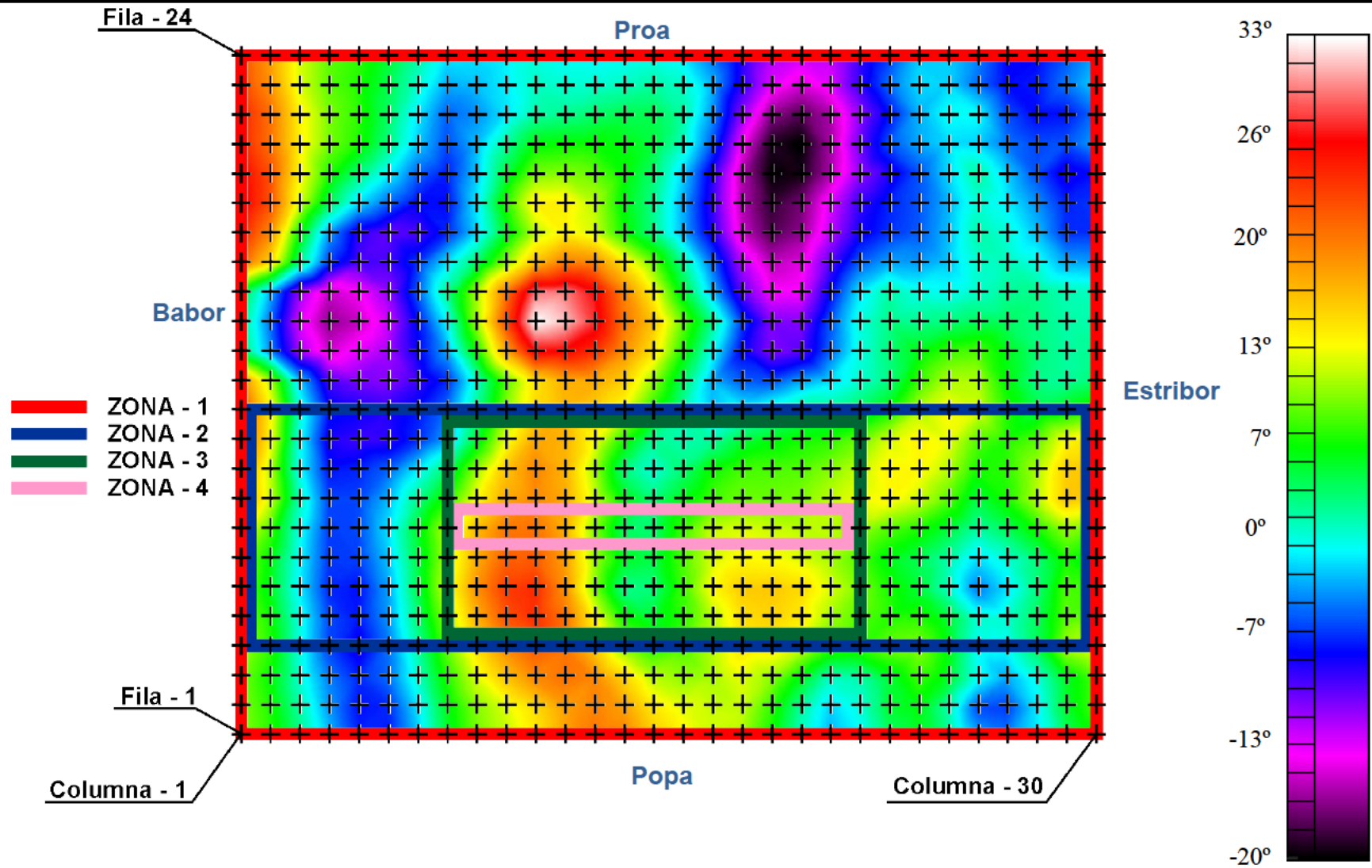


Figura 6.35. Zonas de estudio del error de rumbo magnético en la plataforma P4.

6.6.1. Análisis de resultados

Al igual que se hizo para las anteriores plataformas se van a establecer los valores de los parámetros V_{MAX} , V_{MIN} , V_{PRO} , VA_{Emax} , VA_{Emin} y $PVAE$ calculados según las ecuaciones (5.2), (5.3), (5.4), (5.6), (5.7) y (5.8), respectivamente. Las tablas 6.8 y 6.9 muestran los valores para las cuatros zonas establecidas.

Tabla 6.8. Valores máximo, mínimo y promedio de la densidad de flujo magnético.

X,Y,Z	Zona	V_{MAX}	V_{MIN}	V_{PRO}	Zona	V_{MAX}	V_{MIN}	V_{PRO}
X	1	10.575	-8.380	1.740	3	6.960	-8.380	156
	2	9.082	-8.380	279	4	4.808	-4.962	539
Y	1	31.170	10.510	21.297	3	23.799	10.510	17.251
	2	29.205	10.510	18.293	4	21.861	12.929	16.059
Z	1	62.639	29.235	46.817	3	58.613	33.920	47413
	2	62.042	33.920	48.760	4	53.673	44.206	48.124

Tabla 6.9. Valores máximo, mínimo y promedio del error de rumbo en grados.

Parámetro	Zona	VA_{Emax}	VA_{Emin}	$PVAE$
VAE	1	33°	-20°	4°
	2	33°	-20°	2°
	3	33°	-20°	3°
	4	20°	-15°	2°

La tabla 6.10 muestra los parámetros que nos dan una idea global de las variaciones de campo entre los máximos y los mínimos locales en la zona Z3, $GEPFX$ (ecuación (5.11)), $GEPFY$ (ecuación (5.12)) y $GEPFZ$ (ecuación (5.13)), $GEPCX$ (ecuación (5.16)), $GEPCY$ (ecuación (5.17)) y $GEPCZ$ (ecuación (5.18)), $GMERPF$ (ecuación (5.20)) y $GMERPC$ (ecuación (5.22)).

Tabla 6.10. Valores de los parámetros $GEPF$, $GEPC$, $GMERPF$ y $GMERFC$ para la zona Z3.

$GEPFX$	2.467 nT/m	$GEPCX$	1.428 nT/m
$GEPFY$	1.213 nT/m	$GEPCY$	2.229 nT/m
$GEPFZ$	1.667 nT/m	$GEPCZ$	3.657 nT/m
$GMERPF$	9°/m	$GMERPC$	5°/m

Las curvas promedio por filas, por columnas y del error de rumbo para la zona Z3 se muestran a continuación. En estas curvas se destaca el menor gradiente respecto a las otras Plataformas medidas de la serie como se verá posteriormente en el estudio comparativo.

En los promedios por filas de cada una de las componentes (figura 6.36) no se aprecian variaciones que evidencien la existencia de dipolos que puedan producir errores de rumbo en los sensores.

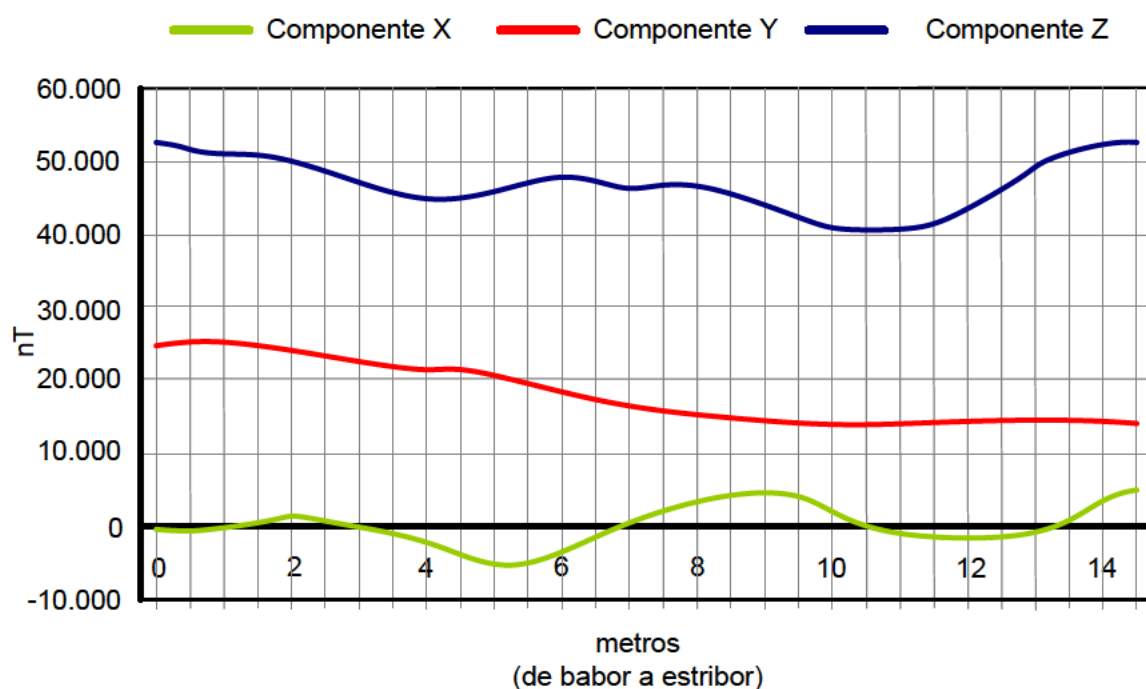


Figura 6.36. Promediado mapa magnético por filas a rumbo 360° en la plataforma *P4*.

En los promedios por columnas de cada una de las componentes (figura 6.37) se encontraría la influencia de un dipolo transversal pequeño a 4,5 metros desde popa. Dicho dipolo produciría una pequeña influencia sobre los sensores de rumbo.

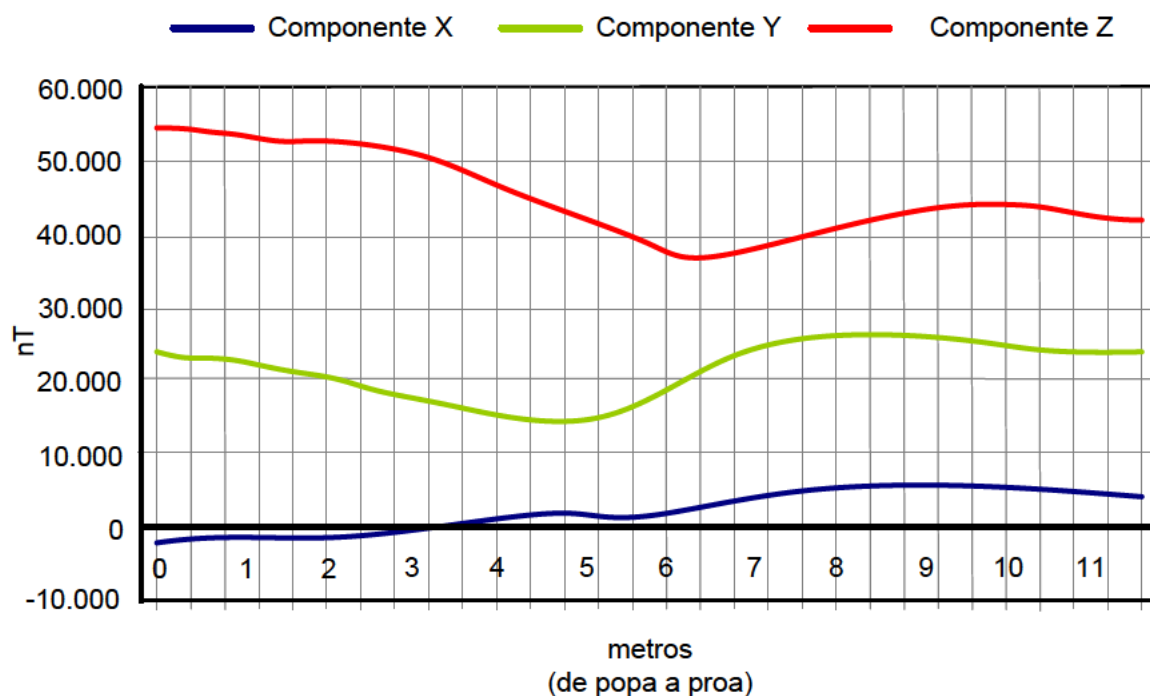


Figura 6.37. Promediado mapa magnético por columnas a rumbo 360° en la plataforma *P4*.

Esa pequeña componente transversal puede tener efecto sobre una brújula u otro tipo de sensor magnético que utilice la componente horizontal del campo magnético existente para dar información del rumbo magnético.

Por otro lado, se pueden tomar las componentes X e Y de los promedios por filas y columnas para calcular el valor del error de rumbo utilizando las expresiones 5.19 y 5.21 para el promedio por filas y el promedio por columnas, respectivamente. Como se aprecia en la figura 6.38 el error de rumbo en la dirección popa-proa a 4,5 metros es del orden de 7° y en la dirección babor a estribor a 5,5 y 9 metros del orden de -15° y 15° , respectivamente.

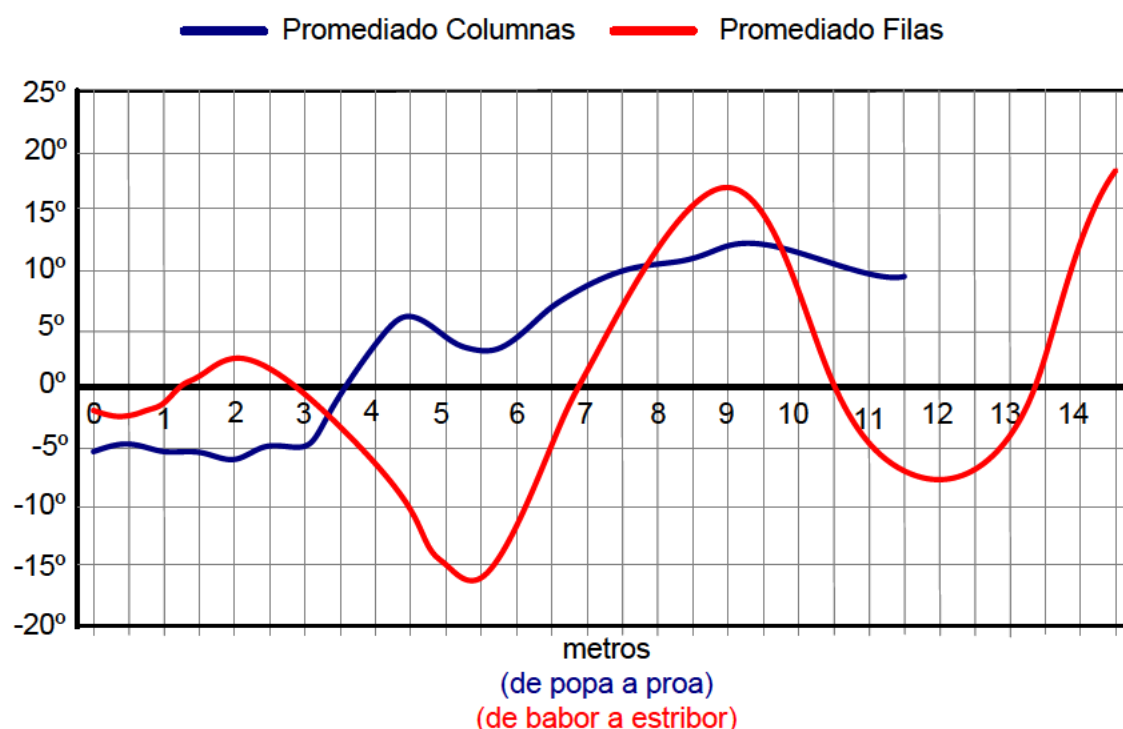


Figura 6.38. Error de rumbo promediado en la plataforma $P4$.

6.7. Conclusiones

El sistema diseñado para el levantamiento de mapas magnéticos ha probado ser muy útil para la medida de las magnetizaciones presentes sobre las cubiertas de vuelo de las plataformas $P2$, $P3$ y $P4$. De todas ellas la que presenta a priori una magnetización que puede afectar a las operaciones de vuelo sobre la cubierta es la $P4$ aunque es de inferior magnitud a la anomalía magnética que presenta la plataforma $P1$ según el estudio realizado en el capítulo 5.

Capítulo 7

Estudio comparativo de mapas magnéticos

7.1 Introducción

Para el estudio de la anomalía magnética en las plataformas $P1$, $P2$, $P3$ y $P4$, se van a utilizar los parámetros de promediado por filas y columnas para la zona $Z3$ (puntos (8,4)-(23,4)-(23,12)-(8,12) de cada una de ellas; ver apéndice A). También se han añadido los datos de una plataforma de referencia ($PREF$) dónde no se han manifestado los errores de rumbo magnético en los sensores de los helicópteros.

7.2 Descripción del procedimiento

La comparación entre los diferentes mapas magnéticos se realizará teniendo en cuenta diferentes parámetros que se extraerán de las ecuaciones (5.9) y (5.14) particularizadas para la zona $Z3$, el promedio por filas y el promedio por columnas, respectivamente.

Para dicha zona, el promedio por filas (PF) se calcula promediando las nueve filas comprendidas entre la fila 4 y 12, ambas inclusive, para los treinta puntos de las columnas. La ecuación (7.1) del promedio por filas es la ecuación (5.9) particularizada para la zona $Z3$.

$$PF(i, x, y, z) = \frac{1}{9} \sum_{j=4}^{12} \left(\vec{B}_{P(i,j)}(x, y, z) \right) \Bigg|_{1 \leq i \leq 30} \quad (7.1)$$

Dónde,

$\vec{B}_{P(i,j)}^{H,\theta}(x, y, z)$ es la inducción magnética de un punto $P(i, j)$ de la Plataforma en una zona de la Tierra H a un rumbo θ .

Lo mismo sucede para el promediado por columnas (PC) de las 16 filas comprendidas entre la columna 8 y la 23, ambas inclusive, para los 24 puntos de las columnas. Particularizando la ecuación (5.14) obtenemos la siguiente ecuación:

$$PC(j, x, y, z) = \frac{1}{16} \sum_{i=8}^{23} \left(\vec{B}_{P(i,j)}^{H,\theta}(x, y, z) \right) \Big|_{1 \leq j \leq 24} \quad (7.2)$$

El primer parámetro que se va a utilizar no se ha definido hasta ahora y está relacionado con la existencia de un máximo o mínimo local y el promedio del campo magnético medido. Este parámetro nos dará una indicación de la existencia e importancia de magnetización. Los denominaremos desviación del máximo o mínimo respecto del promedio (DMP); para filas ($DMPF$) y columnas ($DMPC$).

Para el cálculo de $DMPF(x, y, z)$ (ecuación (7.3)) se calculan primero los valores de $MaPF(x, y, z)$ y de $MiPF(x, y, z)$. $MaPF(x, y, z)$ (ecuación (7.4)) es el valor absoluto de la diferencia entre el máximo del promedio por filas $PF(i, x, y, z)$ (30 puntos) y su promediado. $MiPF(x, y, z)$ (ecuación (7.4.)) es el valor absoluto de la diferencia entre el promedio por filas y su mínimo.

$$DMPF(x, y, z) = \text{Max} \left(MaPF(x, y, z); MiPF(x, y, z) \right) \quad (7.3)$$

Dónde,

$$\begin{aligned} MaPF(x, y, z) &= \text{ABS} \left(\text{Max} \left(PF(i, x, y, z) \Big|_{1 \leq i \leq 30} \right) - \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} PF(i, x, y, z) \right) \\ MiPF(x, y, z) &= \text{ABS} \left(\frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} PF(i, x, y, z) - \text{Min} \left(PF(i, x, y, z) \Big|_{1 \leq i \leq 30} \right) \right) \end{aligned} \quad (7.4)$$

Para el cálculo de $DMPC(x, y, z)$ (ecuación (7.5)) se calculan primero los valores de $MaPC(x, y, z)$ y de $MiPC(x, y, z)$. $MaPC(x, y, z)$ (ecuación (7.6)) es el valor absoluto de la diferencia entre el máximo del promedio por filas $PC(i, x, y, z)$ (24 puntos) y su promediado. $MiPC(x, y, z)$ (ecuación (7.6)) es el valor absoluto de la diferencia entre el promedio por filas y su mínimo.

$$DMPC(x, y, z) = \text{Max} \left(MaPC(x, y, z); MiPC(x, y, z) \right) \quad (7.5)$$

Dónde,

$$\begin{aligned} MaPC(x, y, z) &= ABS \left(\text{Max} \left(PC(j, x, y, z) \right)_{1 \leq j \leq 24} - \frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} PC(j, x, y, z) \right) \\ MiPC(x, y, z) &= ABS \left(\frac{1}{24} \sum_{j=1}^{24} PC(j, x, y, z) - \text{Min} \left(PC(j, x, y, z) \right)_{1 \leq j \leq 24} \right) \end{aligned} \quad (7.6)$$

El segundo parámetro utilizado en este estudio es el gradiente extendido por filas y por columnas, *GEPF* y *GEPC*, respectivamente. Las ecuaciones que se han utilizado para su cálculo son la (5.10) para *GEPF* y (5.15) para *GEPC* particularizadas para la zona Z3. Las expresiones siguientes muestran estos dos parámetros para las tres componentes cartesianas: (*GEPF_X* y *GEPC_X*) para la componente *X*, (*GEPF_Y* y *GEPC_Y*) para la componente *Y*, y (*GEPF_Z* y *GEPC_Z*) para la componente *Z*.

$$GEPF_X = \frac{2}{(ix_{\max} - ix_{\min})} \left[\left. B_{P(i_{x_{\max}})}^{H, \theta}(x) \right|_{ix_{\max} \in Z_3} - \left. B_{P(i_{x_{\min}})}^{H, \theta}(x) \right|_{ix_{\min} \in Z_3} \right] \quad (7.7)$$

$$GEPF_Y = \frac{2}{(iy_{\max} - iy_{\min})} \left[\left. B_{P(i_{y_{\max}})}^{H, \theta}(y) \right|_{iy_{\max} \in Z_3} - \left. B_{P(i_{y_{\min}})}^{H, \theta}(y) \right|_{iy_{\min} \in Z_3} \right] \quad (7.8)$$

$$GEPF_Z = \frac{1}{(iz_{\max} - iz_{\min})} \left[\left. B_{P(i_{z_{\max}})}^{H, \theta}(z) \right|_{iz_{\max} \in Z_3} - \left. B_{P(i_{z_{\min}})}^{H, \theta}(z) \right|_{iz_{\min} \in Z_3} \right] \quad (7.9)$$

Dónde, $B_{P(i_{x_{\max}})}^{H, \theta}(x)$ es la componente *X* de la inducción magnética promediada por filas en el punto dónde ésta presenta un máximo ix_{\max} de la Plataforma en un punto de la Tierra *H* a un rumbo θ .

De la misma manera, para las componentes *Y* y *Z* de la inducción magnética promediada por filas tenemos $B_{P(i_{y_{\max}})}^{H, \theta}(y)$ y $B_{P(i_{z_{\max}})}^{H, \theta}(z)$ en los puntos dónde presentan un máximo, iy_{\max} y iz_{\max} , respectivamente.

$$GEPC_X = \frac{2}{(jx_{\max} - jx_{\min})} \left[\left. B_{P(j_{x_{\max}})}^{H, \theta}(x) \right|_{jx_{\max} \in Z_3} - \left. B_{P(j_{x_{\min}})}^{H, \theta}(x) \right|_{jx_{\min} \in Z_3} \right] \quad (7.10)$$

$$GEPC_Y = \frac{2}{(jy_{\max} - jy_{\min})} \left[\left. B_{P(j_{y_{\max}})}^{H, \theta}(y) \right|_{jy_{\max} \in Z_3} - \left. B_{P(j_{y_{\min}})}^{H, \theta}(y) \right|_{jy_{\min} \in Z_3} \right] \quad (7.11)$$

$$GEPC_Z = \frac{1}{(jz_{\max} - jz_{\min})} \left[\left. B_{P(j_{z_{\max}})}^{H, \theta}(z) \right|_{jz_{\max} \in Z_3} - \left. B_{P(j_{z_{\min}})}^{H, \theta}(z) \right|_{jz_{\min} \in Z_3} \right] \quad (7.12)$$

Dónde, $B_{P(jx_{\max})}(x)$, $B_{P(jy_{\max})}(y)$ y $B_{P(jz_{\max})}(z)$ representan las componentes X , Y y Z de la inducción magnética promediada por columnas en los puntos dónde éstas presentan un máximo.

El tercer parámetro utilizado también fue definido anteriormente con las ecuaciones (5.20) y (5.22) y representan al gradiente del error de rumbo para las Filas (*GMERPF*) y para Columnas (*GMERPC*), respectivamente.

Los dos últimos parámetros utilizados también fueron definidos anteriormente y están relacionados con el valor del error de rumbo (*VAE*). Son el *PVAE* (ecuación (5.8)) y *VAEmax* (ecuación (5.6)), valores promedio y máximo del *VAE* (ecuación (5.5)), respectivamente.

7.3. Promediado por filas

La componente transversal (X) presenta claras diferencias entre las cuatro Plataformas. La diferencia más importante corresponde a la plataforma *P1* cuyo máximo corresponde a una magnetización transversal responsable de la anomalía magnética.

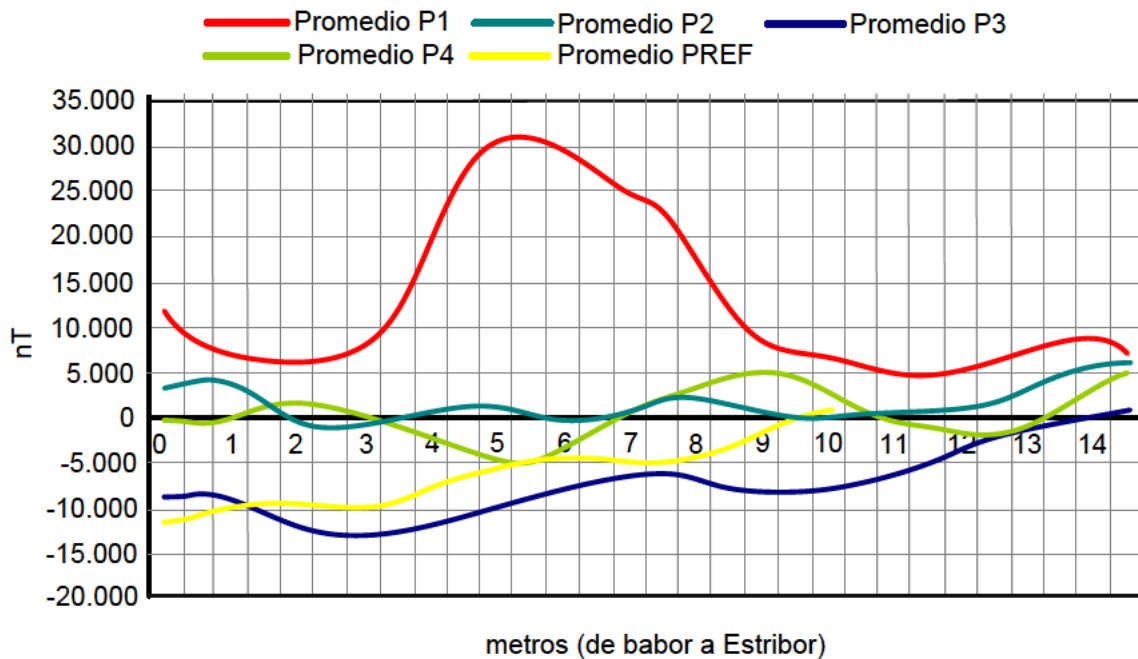


Figura 7.1. Promediado por filas de la componente X ($PFX()$).

Tabla 7.1. Valores de los parámetros *DMPFX* y *GEPFX* para las cinco plataformas medidas.

Plataforma	DMPFX (nT)	GEPFX (nT/m)
P1	18.479	4.827
P2	1.312	1.480
P3	4.216	855
P4	5.207	2.467
PREF	4.642	1.245

Los parámetros $DMPFX$ (7.3) en nT y $GEPFX$ (5.11) en nT/m para la componente X para las cuatro plataformas medidas presentan los valores mostrados en la tabla 7.1.

Los resultados para la componente X se pueden resumir en las siguientes relaciones:

$$DMPFX: P1 >> P4 > P2 > PREF > P3$$

$$GEPFX: P1 >> P4 > P2 > PREF > P3$$

La componente X muestra que la plataforma $P1$ tenía una magnetización transversal muy importante, cosa que no ocurre en el resto de las plataformas medidas cuya magnetización transversal es similar.

Al igual que la componente X la única Plataforma que presenta diferencias respecto de los otros en la componente Y es la plataforma $P1$ (figura 7.2).

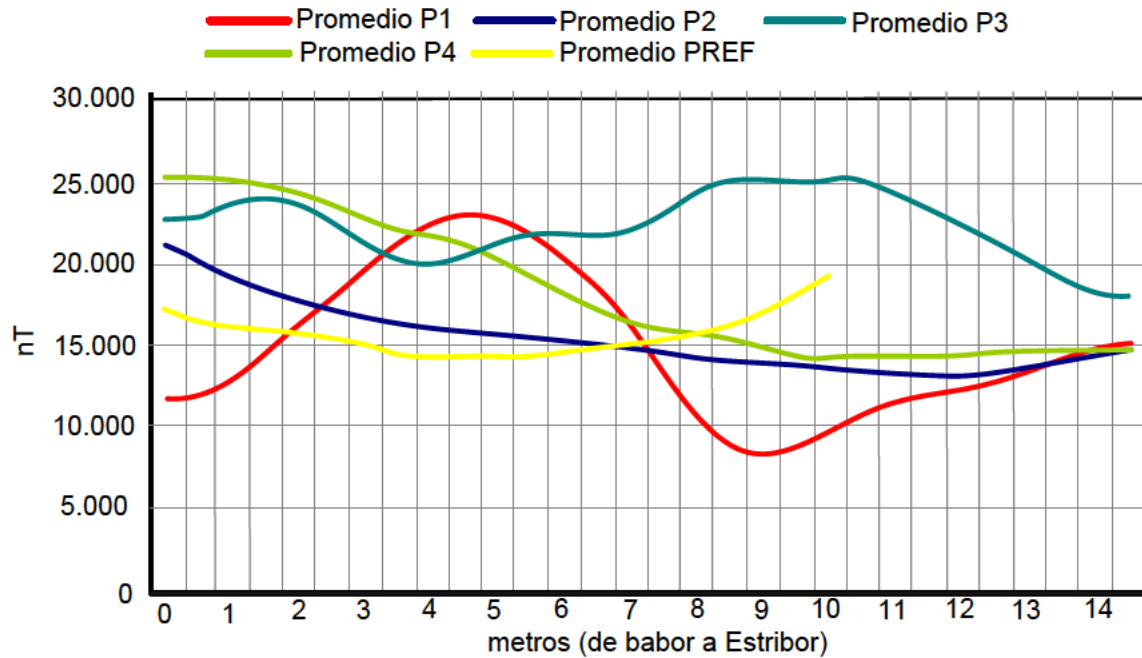


Figura 7.2. Promediado por filas de la componente Y ($PFY(i)$).

Tabla 7.2. Valores de los parámetros $DMPFY$ y $GEPFY$ para las cinco plataformas medidas.

Plataforma	$DMPFY$ (nT)	$GEPFY$ (nT/m)
$P1$	7.716	3.159
$P2$	2.814	850
$P3$	3.734	414
$PREF$	1.837	717
$P4$	4.890	1.213

La tabla 7.2 presenta los valores de los parámetros $DMPF$ (7.3) en nT y $GEPFY$ (5.12) en nT/m para la componente Y en los cuatro Plataformas medidas.

Los resultados para la componente Y se pueden resumir en las siguientes relaciones:

$$DMPFY: P1 >> P4 > P3 > P2 > PREF$$

$$GEPFY: P1 >> P4 > P2 \approx PREF > P3$$

La componente Y muestra que la Plataforma P1 tenía una componente longitudinal importante, cosa que no ocurre en el resto de Plataforma medidas cuya componente longitudinal es similar.

Igual que las componente X e Y, la componente Z de la Plataforma P1 muestra una gran diferencia respecto a los otras tres Plataformas debido a la magnetización transversal descrita.

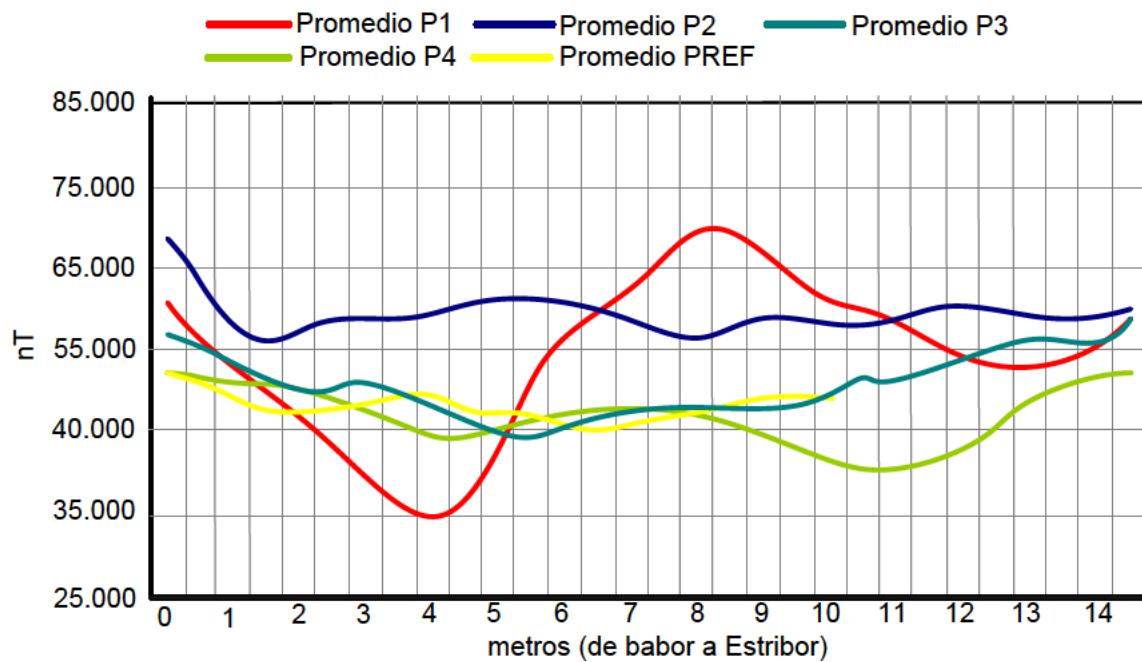


Figura 7.3. Promediado por filas de la componente Z ($PFZ(i)$).

Tabla 7.3. Valores de los parámetros $DMPFZ$ y $GEPFZ$ para las cinco plataformas medidas.

Plataforma	$DMPFZ$ (nT)	$GEPFZ$ (nT/m)
<i>P1</i>	19.982	8.727
<i>P2</i>	3.822	1.223
<i>P3</i>	2.188	1.420
<i>PREF</i>	1.885	392
<i>P4</i>	1.677	4.688

Los parámetros $DMPFZ$ (7.3) en nT y $GEPFZ$ (5.13) en nT/m para la componente Z calculados para las cuatro Plataformas medidas presentan los valores que se muestran en la tabla 7.3.

Los resultados para la componente Z se pueden resumir en las siguientes relaciones:

$$DMPFZ: P1 >> P3 > P4 > P2 > PREF$$

$$GEPFZ: P1 >> P4 > P3 > P2 >> PREF$$

La componente Z muestra que la plataforma $P1$ tenía una componente vertical mucho mayor que el resto. También destaca el menor gradiente de la Plataforma de Referencia respecto al resto de Plataformas.

7.4. Promediado por columnas

Como puede apreciarse en la figura 7.4, la componente X no presenta grandes variaciones como era de esperar ya que el magnetismo transversal no se manifiesta en el sentido de las columnas.

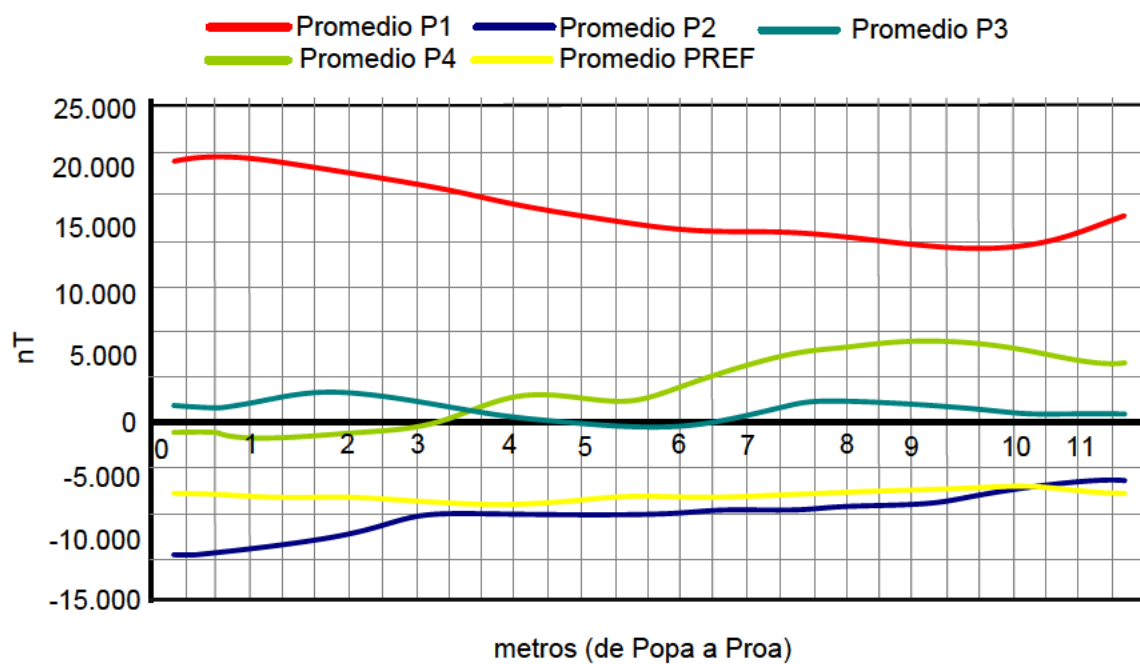


Figura 7.4. Promediado por columnas de la componente X ($PCX(j)$).

Los parámetros $DMPC$ (ecuación 7.5) en nT y $GEPCX$ (ecuación 5.16) en nT/m para la componente X en las cuatro Plataformas medidas presentan los valores listados en la tabla 7.4.

Tabla 7.4. Valores de los parámetros $DMPCX$ y $GEPCX$ para las cinco plataformas medidas.

Plataforma	$DMPCX$ (nT)	$GEPCX$ (nT/m)
$P1$	3.793	1.220
$P2$	1.391	918
$P3$	1.596	937
$PREF$	244	106
$P4$	1.874	1.428

Los resultados para la componente X se pueden resumir en las siguientes ecuaciones:

$$DMPCX: P1 > P4 > P3 > P2 > > PREF$$

$$GEPCX: P4 > P1 > P3 \cong P2 > > PREF$$

La componente X muestra que no existen grandes diferencias entre las cuatro Plataformas, aunque sí entre éstas y la de referencia. Ésta diferencia no se considera significativa ya que son Plataformas diferentes.

En la figura 7.5 puede verse como las cinco Plataformas presentan en la componente Y una magnetización vertical importante en popa. La plataforma $P3$ aunque aparentemente presenta un valor más alto en la popa tiene un valor medio mucho mayor a las demás por lo que su gradiente no es el mayor de las cinco.

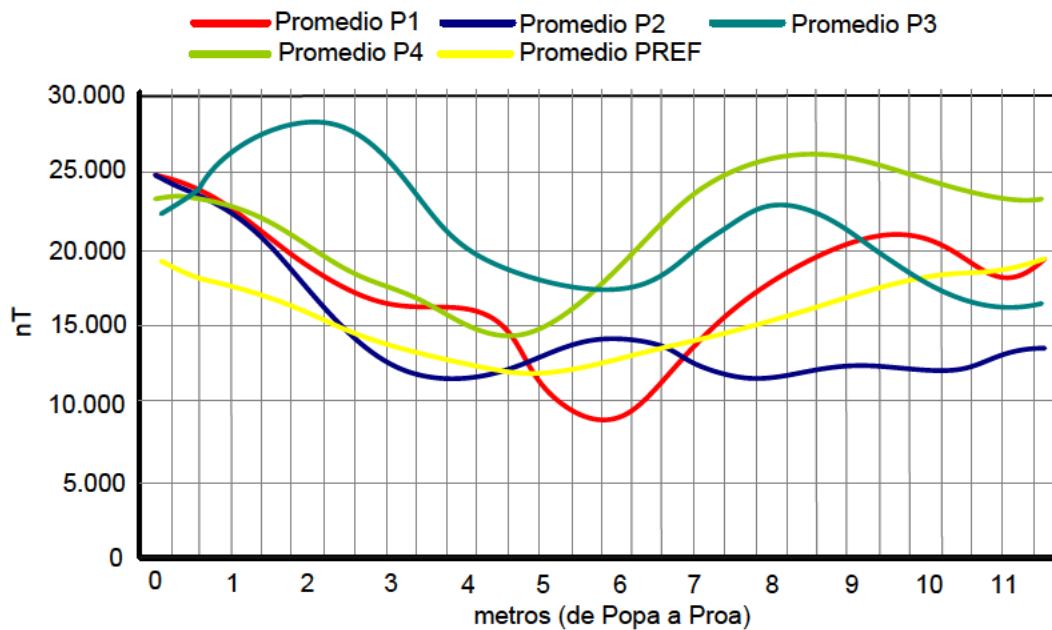


Figura 7.5. Promediado por columnas de la componente Y ($PCY(j)$).

Los parámetros $DMPC$ (ecuación 7.5) en nT y $GEPCY$ (ecuación 5.17) en nT/m para la componente Y para las cuatro Plataformas medidas presentan valores que se muestran en la tabla 7.5.

Tabla 7.5. Valores de los parámetros $DMPCY$ y $GEPCY$ para las cinco plataformas medidas.

Plataforma	$DMPCY$ (nT)	$GEPCY$ (nT/m)
$P1$	8.504	2.869
$P2$	5.436	3.084
$P3$	6.021	3.391
$PREF$	3.084	1.366
$P4$	4.130	2.229

Los resultados para la componente Y se pueden resumir en las siguientes ecuaciones:

$$DMPCY: P1>P3>P2>P4>PREF$$

$$GEPCY: P3>P2>P1>P4>PREF$$

En la figura 7.6 puede apreciarse la componente Z de las cinco Plataformas. Tiene una importante magnetización vertical en la zona de popa como ya se había comentado.

La tabla 7.6 muestra los valores de los parámetros *DMPC* (ecuación (7.5)) en nT y *GEPCZ* (ecuación (5.18)) en nT/m para la componente Z en las cuatro Plataformas medidas más la de referencia.

Tabla 7.6. Valores de los parámetros DMPCZ y GEPCZ para las cinco plataformas medidas.

Plataforma	<i>DMPFZ</i> (nT)	<i>GEPCZ</i> (nT/m)
<i>P1</i>	9.186	1.730
<i>P2</i>	3.801	3.639
<i>P3</i>	6.364	3.485
<i>PREF</i>	5.782	2.579
<i>P4</i>	7.734	3.657

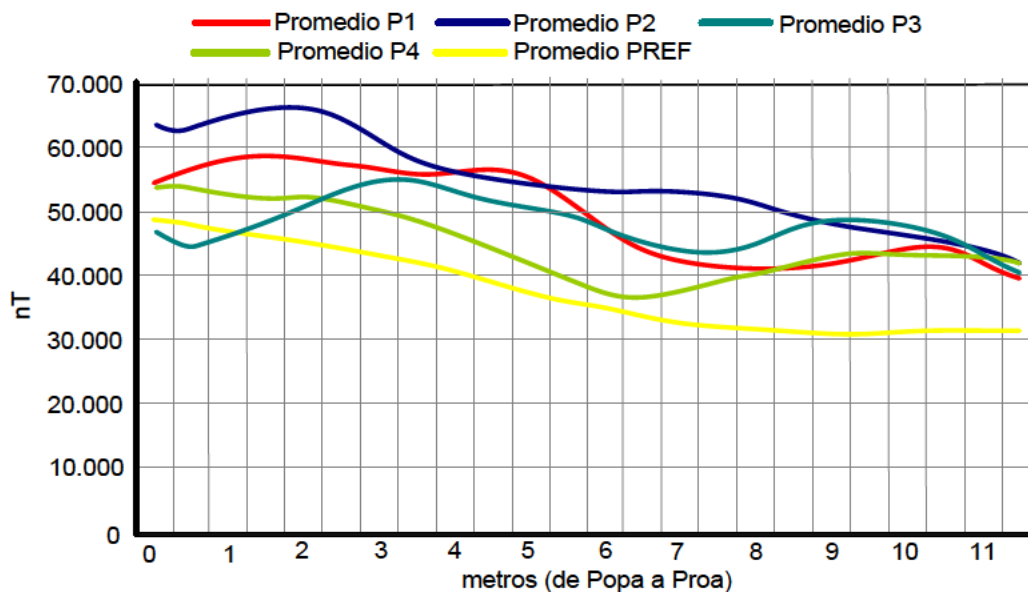


Figura 7.6. Promediado por columnas de la componente Z (*PCZ(j)*).

Los resultados para la componente Z se pueden resumir en las siguientes ecuaciones:

$$DMPFZ: P1>>P4>P3>PREF>P2$$

$$GEPFZ: P4\cong P2>P3>PREF>P1$$

El tener una magnetización vertical importante sin mucho gradiente que abarque una zona determinada no es importante para una brújula o un magnetómetro horizontal de dos ejes

(transversal y longitudinal) que se encuentre dentro de la zona. En los extremos de la zona sí puede tener cierta influencia debido a que las líneas de campo magnético se vuelven horizontales aunque de mucha menor intensidad.

7.5. Error de rumbo

Una vez analizadas las curvas por filas y columnas vamos a utilizar las componentes X e Y de cada promediado para calcular el valor del error de rumbo (ecuación (5.4)) y del gradiente del error de rumbo por filas $GMERPF$ (ecuación (5.20)) y por columnas $GMERPC$ (ecuación (5.22)).

Los parámetros $PVAE$ (ecuación (5.8)) y $VAEmax$ (ecuación (5.6)) en grados y $GMERPF$ y $GMERPC$ en $^{\circ}/m$ para las cinco plataformas medidas presentan los valores mostrados en la tabla 7.7.

Tabla 7.7. Valores de los parámetros $VAEmax$, $PVAE$, $GMERPF$ y $GMERPC$ para las cinco plataformas medidas.

Plataforma	$VAEmax$ ($^{\circ}$)	$PVAE$ ($^{\circ}$)	$GMERPF/PC$ ($^{\circ}/m$)
$P1$	80/84	72	20/12
$P2$	10/8	8	10/6
$P4$	16/12	10	15/9
$PREF$	24/24	18	11/4
$P3$	6/4	3	6/4

Los resultados de los parámetros que cuantifican el error de rumbo se pueden resumir en las siguientes ecuaciones:

$$VAEmax/PVAE: P1 >> PREF > P2 > P4 > P3$$

$$GMERPF/PC: P1 > P4 > P2 \cong PREF > P3$$

En la figuras 7.7 y 7.8 se muestran las gráficas del error de rumbo promediado por filas y por columnas, respectivamente.

El valor del error de rumbo es mucho mayor en la Plataforma $P1$ que en el resto de Plataformas medidas. Aunque en la Plataforma de Referencia medida el error de rumbo es mayor que en la $P2$, $P3$ y $P4$, el gradiente es inferior y similar al de la $P2$. La $P3$ es la que presenta menor anomalía de todas las Plataformas medidas.

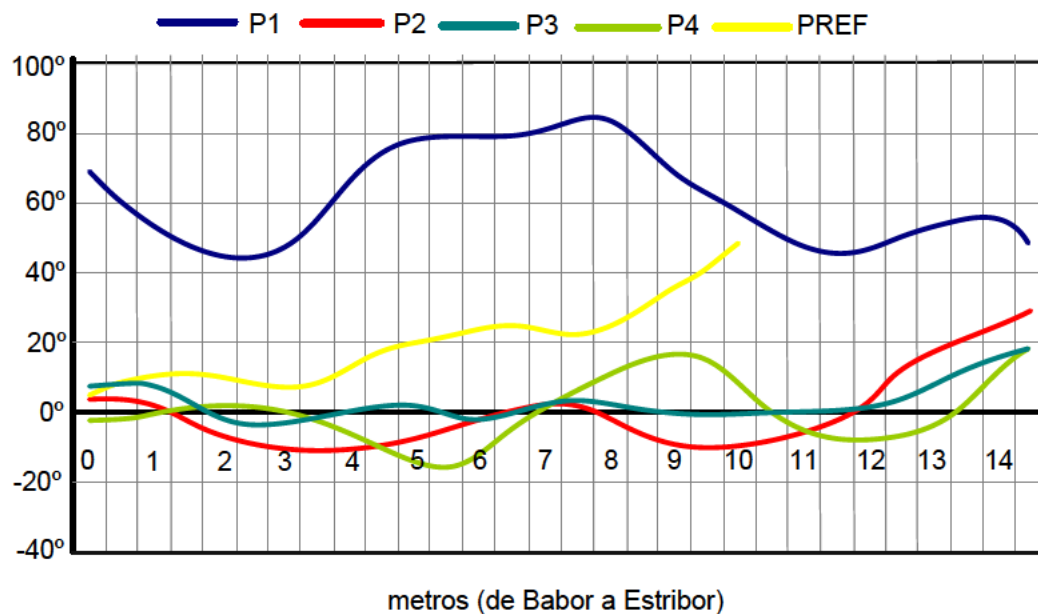


Figura 7.7. Error de rumbo promediado por filas.

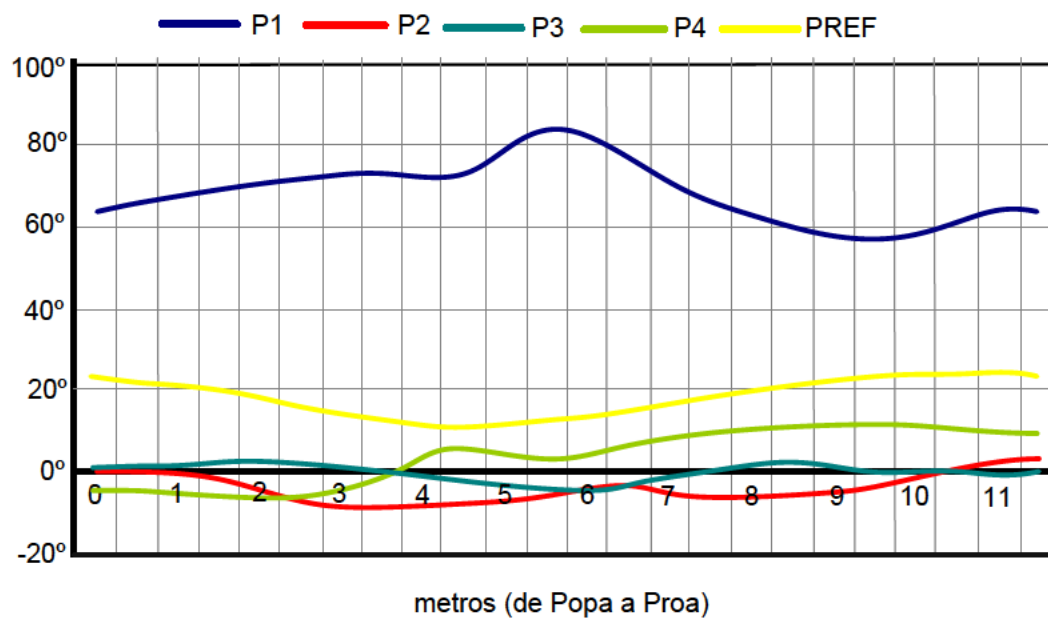


Figura 7.8. Error de rumbo promediado por columnas.

7.6. Clasificación de las anomalías magnéticas

Después de la valoración individual de las plataformas bajo estudio en los capítulos 5 y 6, se ha hecho la comparación con una plataforma de referencia. La plataforma de referencia es un buque dónde se conoce que no existen anomalías magnéticas sobre su cubierta de vuelo, y servirá para clasificar dichas anomalías definiendo los umbrales de cada uno de los parámetros estudiados. Estos valores límite indicarán si existe una anomalía y el grado de severidad de la misma (sólo dos niveles de anomalía). Se definirán los umbrales para los parámetros *DMPF* (ecuación (7.3)), *DMPC* (ecuación (7.5)), *GEPF* (ecuación (5.10)), *GEPC* (ecuación (5.15)), *GMERPF* (ecuación (5.20)) y *GMERPC* (ecuación (5.22)). Estos valores umbrales se establecerán referidos a la plataforma de referencia.

En primer lugar vamos a estudiar los parámetros *DMPF*, *DMPC*, *GEPF* y *DMPC* ya que sus valores están relacionados con los máximos o mínimos y la variación del campo magnético entre ellos. Para ello vamos a tratar de asociar las formas de tres dipolos magnéticos ideales de tipo transversal, longitudinal y vertical, centrados en la zona de estudio con estos cuatro parámetros. Podemos clasificar cada dipolo para cada componente (B_x , B_y , B_z) y para cada promedio (por filas y por columnas) utilizando el comportamiento par o impar de las curvas de campo magnético (ver capítulo 3). Como se utilizan promediados por filas y columnas se puede extraer información sobre los valores acumulativos o sustractivos. Un comportamiento par en las filas o en las columnas significa que el valor promediado es acumulativo y un comportamiento impar implica que el promediado en las filas o columnas anula su valor. Dentro de las curvas con comportamiento par se van a clasificar éstas en “++” si la curva del promediado resultante es siempre positiva o “+-“ si la curva del promediado resultante tiene una parte positiva y otra negativa. Ver tabla 7.8.

Tabla 7.8. Análisis de la forma de las curvas de promediado para cada componente de tres dipolos ideales de un solo componente.

Tipo Dipolo	Componente del Campo Magnético			Promediado
	B_x	B_y	B_z	
Transversal	++	Nulo	Nulo	Por Columnas
	++	Nulo	+-	Por Filas
Longitudinal	Nulo	++	+-	Por Columnas
	Nulo	++	Nulo	Por Filas
Vertical	Nulo	++	++	Por Columnas
	+-	Nulo	++	Por Filas

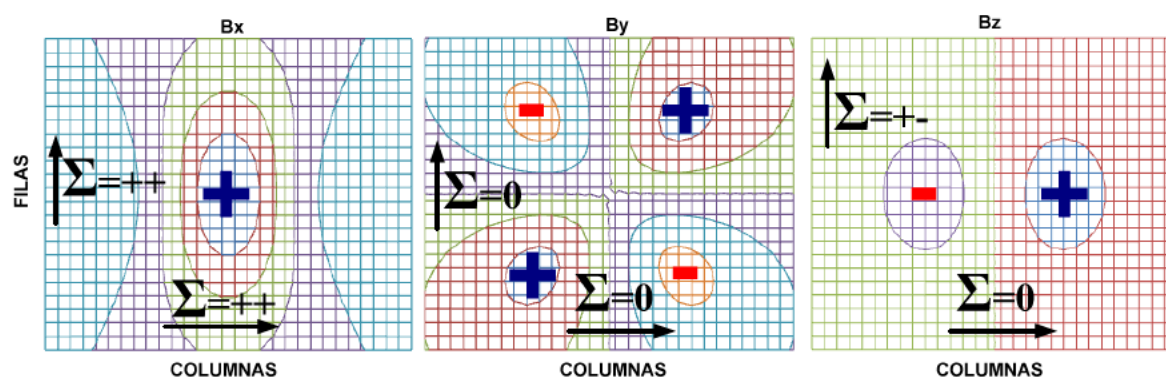
En la figura 7.9 puede verse de forma gráfica la manera de calcular como el promediado por filas y por columnas afecta al valor de las componentes B_x , B_y y B_z del campo magnético. Por ejemplo, un dipolo vertical ideal centrado tanto en las filas y como en las columnas resultaría en los promediados lo siguiente:

- Por filas
 - B_x sería una función impar.
 - B_y se anularía.

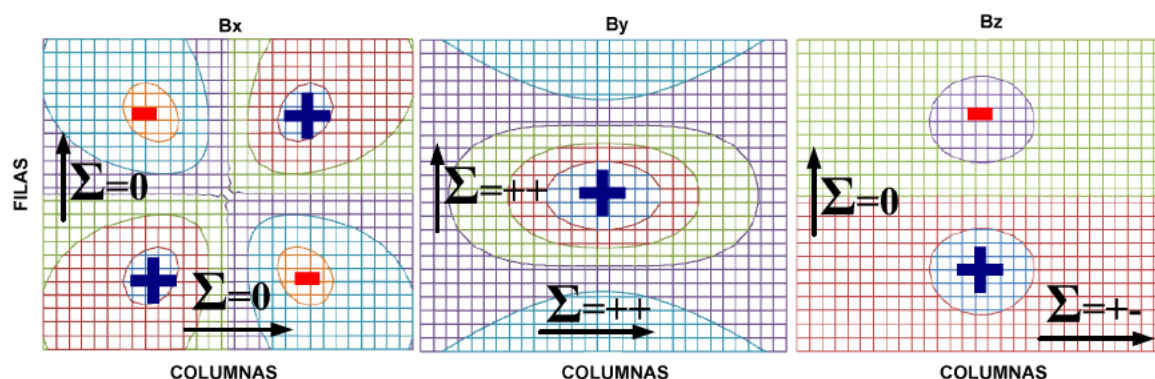
- B_z sería una función par.
- Por columnas
 - B_x se anularía.
 - B_y sería función par.
 - B_z sería una función par.

El mismo razonamiento se ha seguido para los dipolos transversales y longitudinales.

DIPOLO TRANSVERSAL



DIPOLO LONGITUDINAL



DIPOLO VERTICAL

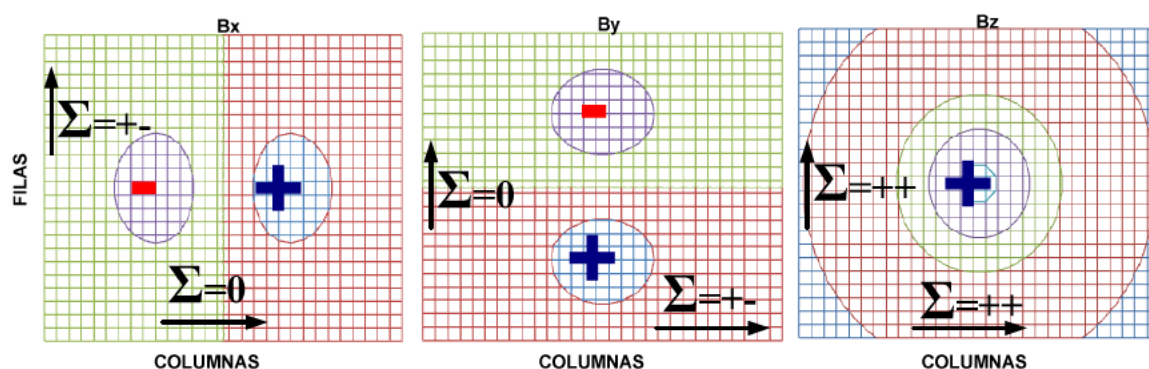


Figura 7.9. Evaluación de los promediados por filas y por columnas para dipolos transversales, longitudinales y verticales.

De esta manera utilizando la distribución par e impar podremos extraer información sobre los valores resultantes de los parámetros $DMPF$, $DMPC$, $GEPF$ y $GEPC$. Para ello, teniendo en cuenta cada parámetro y cada componente, podemos establecer el tipo de dipolo que puede

información de la tabla 7.8 para establecer, en función de cada parámetro y de cada componente (B_x , B_y y B_z), qué tipo de dipolos serían los responsables de su valor.

Tabla 7.9. Contribuciones cada tipo de dipolo a los valores de los parámetros DM y GE para cada componente.

Parámetro	Componente del Campo Magnético		
	B_x	B_y	B_z
DMPF	Transversal+ Vertical+-	Longitudinal+	Transversal- Vertical+
GEPF	Transversal+ Vertical+-	Longitudinal+	Transversal+- Vertical+
DMPC	Transversal+	Longitudinal+- Vertical+-	Longitudinal+- Vertical+
GEPC	Transversal+	Longitudinal+ Vertical+-	Longitudinal+- Vertical+

Los signos que acompañan a cada tipo de dipolo en la tabla 7.9 están relacionados con el comportamiento par (“+”) o impar (“+-”) y su contribución a los parámetros mencionados. Para interpretar esta tabla tomaremos una componente del campo magnético de la que tendremos un valor importante de uno de los parámetros; la casilla correspondiente de la tabla indica el tipo de dipolo responsable de su valor y si este tendrá valores sólo positivos (función par) o negativos y positivos (función impar). Por ejemplo, si tenemos una componente de campo magnético B_y cuyo $DMPFY$ está por encima de la referencia tendríamos indicios de la existencia de un dipolo longitudinal y tendría un comportamiento par; si también fuera el parámetro $DMPC$ importante respecto de la referencia existiría un comportamiento impar y podría estar causado por un dipolo vertical o longitudinal, o por ambos a la vez. En la realidad los dipolos magnéticos no estarán centrados en la zona de estudio ni coincidirán en el mismo punto por lo que los que incluyen comportamiento impares en su forma (asimetrías respecto de su localización) pueden contribuir de forma negativa a los parámetros DM y GE , haciéndolos más pequeños.

Tabla 7.10. Valores referenciados de los parámetros DM y GE y umbrales para la clasificación de las anomalías.

Parámetro	Plataforma				Umbral Anomalía	
	P1	P2	P3	P4	ADE	AFU
DMPFX/REF	4,0	0,3	0,9	1,1	1,1	2
GEPFX/REF	3,9	1,2	0,7	2,0	1,5	2,5
DMPFY/REF	4,2	1,5	2,0	2,7	2,5	3,5
DMPFY/REF	4,4	1,2	0,6	1,7	1,5	3,5
DMPFZ/REF	10,8	2,1	1,2	2,5	2,0	4,0
GEPFZ/REF	22,3	3,1	3,6	4,3	4,0	6,0
DMPCX/REF	15,5	5,7	6,5	7,7	7,0	10,0
GEPCX/REF	11,5	8,7	8,8	13,5	9,0	12,0
DMPCY/REF	2,8	1,8	2,0	1,3	*	*
GEPCY/REF	2,1	2,3	2,5	1,6	*	*
DMPFZ/REF	1,6	0,7	1,1	1,3	*	*
GEPCZ/REF	0,7	1,4	1,4	1,4	*	*

*No se han establecido umbrales porque no existe diferencias claras en estos parámetros para las cuatro plataformas.

Una vez que sabemos cómo los diferentes tipos de dipolos pueden contribuir a estos parámetros se procede a establecer para cada una de las plataformas medidas los valores de los umbrales de los parámetros *DM* y *GE* para el promediado por filas y por columnas, y para cada una de las componentes del campo magnético. Todos estos valores estarán referenciados a los obtenidos en la plataforma de referencia (*PREF*). Una vez se obtengan estas relaciones se van a establecer los valores umbrales para clasificar las anomalías magnéticas en tres niveles (incluye el de ausencia de la misma). El primer nivel de anomalía será cuando se obtengan valores parecidos a la *PREF* y será clasificado como *sin anomalía* (*SAN*). El segundo nivel estará por encima del anterior y lo denominaremos *anomalía débil* (*ADE*). El último nivel estará muy por encima del encontrado en la *PREF* y será una *anomalía fuerte* (*AFU*). En la tabla 7.10 se muestra todo lo comentado.

Como puede apreciarse en la tabla 7.10 en los promedios por filas existen diferencias apreciables entre los parámetros *DM* y *GE* referenciados y se han establecido unos valores umbrales a partir de los cuales se puede decir que existe una anomalía tipo *ADE* ó *AFU*. En los promedios por columnas sólo se aprecian diferencias claras de los parámetros *DM* y *GE* referenciados en la componente *X* del campo magnético medido por lo que es la única en la que se han definido los umbrales. Se han resaltado en rojo aquellos valores que superan el umbral *AFU* y, por lo tanto, se trata de una anomalía magnética fuerte. En azul también se han marcado los valores que superan al umbral *ADE* pero que son inferiores al *AFU* y, por lo tanto, tiene la consideración de anomalía magnética débil. El resto de los valores no resaltados es porque son inferiores al umbral *ADE* y no tienen una anomalía magnética apreciable (*SAN*).

Tabla 7.11. Cuantificación de los dipolos presentes en cada Plataforma.

Parámetro	Dipolo	P1	P2	P3	P4
DMPFX/REF	Transversal+	+3T	-T	-T	+T
	Vertical+-	+3V	-V	-V	+V
GEPFX/REF	Transversal+	+3T	-T	-T	+T
	Vertical+-	+3V	-V	-V	+V
DMPFY/REF	Longitudinal+	+3L	-L	-L	+L
DMPFY/REF	Longitudinal+	+3L	-L	-L	+L
DMPFZ/REF	Transversal+-	+3T	-T	-T	+T
	Vertical+	+3V	-V	-V	+V
GEPFZ/REF	Transversal+-	+3T	-T	-T	+T
	Vertical+	+3V	-V	-V	+V
DMPCX/REF	Transversal+	+3T	-T	-T	+T
GEPCX/REF	Transversal+	+T	-T	-T	+3T
DMPCY/REF	Longitudinal+	-L	-L	-L	-L
	Vertical+-	-V	-V	-V	-V
GEPCY/REF	Longitudinal+	-L	-L	-L	-L
	Vertical+-	-V	-V	-V	-V
DMPFZ/REF	Longitudinal+-	-L	-L	-L	-L
	Vertical+	-V	-V	-V	-V
GEPCZ/REF	Longitudinal+-	-L	-L	-L	-L
	Vertical+	-V	-V	-V	-V
	Dipolo	P1	P2	P3	P4
TOTAL	Transversal	16T	-6T	-6T	8T
	Longitudinal	2L	-6L	-6L	-2L
	Vertical	8V	-8V	-8V	0V

Las plataformas *P1* y *P4* son las que presentan anomalías *AFU* y *ADE*. Teniendo en cuenta lo presentado en las tablas 7.9 y 7.10 se va a estudiar la presencia de diferentes tipos de dipolos (Transversal=*T*; Longitudinal=*L*; Vertical=*V*) en cada plataforma como causantes de la anomalía magnética. Se dará un peso a cada anomalía (*SAN*= -1; *ADE*=+1; *AFU*=+3) de manera que la suma para cada plataforma nos dirá qué tipos de dipolos están presentes y su cuantificación. Los valores positivos altos (>8) indican la presencia de dipolos que pueden causar anomalías magnéticas. Los valores positivos bajos (≤ 4) y los negativos indican que aunque haya presencia de dipolos estos no son lo suficientemente importantes como para causar una anomalía magnética según la comparación con la plataforma *PREF*. Los valores resultantes se pueden ver en la tabla 7.11.

Se han resaltado de color rojo en la tabla 7.11 aquellos valores de dipolos que pueden producir una anomalía tipo *ADE* ó *AFU*. Como puede verse las Plataformas que presentan dipolos o magnetizaciones de consideración son la *P1* y la *P4*. La plataforma *P1* tiene una presencia importante de magnetizaciones transversales con valor 16 (16T) y una magnetización vertical con valor 8 (8V). Esta magnetización vertical no es importante ya que no produce ningún efecto sobre sensores de rumbo de las aeronaves. La *P4* sólo presenta una magnetización transversal débil de valor 8 (8T). Aunque no era nuestro objetivo inicial hemos conseguido establecer de esta manera un valor umbral para las anomalías *ADE* y *AFU* teniendo en cuenta los dipolos que las producen. En la tabla 7.12 se muestra esta clasificación.

Tabla 7.12. Valores referenciados de los parámetros *DM* y *GE* y umbrales para la clasificación de las anomalías.

Dipolo	Plataforma				Umbral Anomalía	
	P1	P2	P3	P4	ADE	AFU
Transversal	16T	-6T	-6T	8T	4	8
Longitudinal	2L	-6L	-6L	-2L	4	8
Vertical	8V	-8V	-8V	0V	4	8

Como puede verse en la tabla 7.12 los umbrales para la clasificación de las anomalías magnéticas son iguales para los tres tipos de dipolos o magnetizaciones que las producen.

En la tabla 7.10 no se han establecido valores umbrales únicos. Al igual que se ha hecho en las tablas 7.11 y 7.12 se puede establecer un umbral agrupando todas las magnetizaciones para cada parámetro *DM* y *GE*. Por ello, vamos a establecer unos umbrales para los valores de los parámetros *DM* y *GE* promediando los doce valores obtenidos para las filas, columnas y cada una de las componentes de campo magnético. La tabla 7.13 muestra estos valores.

Tabla 7.13. Valores referenciados de los parámetros *DM* y *GE* y umbrales para la clasificación de las anomalías.

Parámetro	Plataforma				Umbral Anomalía	
	P1	P2	P3	P4	ADE	AFU
DM/REF	6,5	2,0	2,3	2,8	2,5	4,5
GE/REF	7,5	3,0	2,9	4,1	3,5	5,5

Una vez que se han establecido los umbrales para las anomalías fuertes (*AFU*) y débiles (*ADE*) de los parámetros *DM* y *GE*, se va a hacer lo mismo con el parámetro *GMER*. Este parámetro se ha estudiado independientemente de los parámetros *DM* y *GE* porque su forma de obtención es muy diferente a los otros dos (relaciones trigonométricas). La tabla 7.14

muestra el parámetro *GMER* promediando el valor obtenido para las filas y las columnas y referenciadas a la plataforma *PREF*.

Tabla 7.14. Valores referenciados del parámetro *GMER* y umbrales para la clasificación de las anomalías.

Parámetro	Plataforma				Umbral Anomalía	
	P1	P2	P3	P4	ADE	AFU
GMERPF/REF	2,4	0,8	1,2	1,8	1,5	2

Resumiendo lo visto en este apartado, las anomalías magnéticas se han clasificado en dos niveles, débiles y fuertes, a parte de la ausencia de la misma. Las anomalías de campo magnético medidas en cubiertas de vuelo de plataformas navales pueden clasificarse teniendo en cuenta los parámetros *DM*, *GE* y *GMER*. En la tabla 7.15 quedan establecidos los valores umbrales para cada uno de estos parámetros.

Tabla 7.15. Clasificación de los diferentes tipos de anomalías en función de los valores de los parámetros *DM*, *GE* y *GMER*.

Parámetro/Referencia	Tipo de anomalía		
	<i>SAN</i>	<i>ADE</i>	<i>AFU</i>
<i>DM/REF</i>	$DM/REF \leq 2,5$	$2,5 < DM/REF \leq 4,5$	$4,5 < DM/REF$
<i>GE/REF</i>	$GE/REF \leq 3,5$	$3,5 < GE/REF \leq 5,5$	$5,5 < GE/REF$
<i>GMER/REF</i>	$GMER/REF \leq 1,5$	$1,5 < GMER/REF \leq 2$	$2 < GMER/REF$

Como se vio en la tabla 7.12 podemos establecer una clasificación de la anomalía en función de los dipolos que han sido detectados como responsables de los valores calculados de los parámetros *DM* y *GE* con sus correspondientes pesos. La tabla 7.16 muestra esta clasificación. Los valores *nT*, *nL* y *nV* son el número de dipolos transversales, longitudinales y verticales resultantes de la tabla de clasificación 7.11.

Tabla 7.16. Clasificación de los diferentes tipos de anomalías en función de los valores de los dipolos que las producen.

Dipolo	Tipo de anomalía		
	<i>SAN</i>	<i>ADE</i>	<i>AFU</i>
<i>Transversal</i>	$nT \leq 4T$	$4T < nT \leq 8T$	$8T < nT$
<i>Longitudinal</i>	$nL \leq 4L$	$4L < nL \leq 8L$	$8L < nL$
<i>Vertical</i>	$nV \leq 4V$	$4V < nV \leq 8V$	$8V < nV$

7.7. Compensación de la anomalía magnética local

De las cinco plataformas (contando con la de Referencia) medidas sólo dos de ellas presentan una anomalía superior a la de referencia, la *P1* y la *P4*. La plataforma *P1* tiene un magnetismo transversal elevado producido por alguna fuente (elemento con una magnetización importante) pero la plataforma *P4* presenta un magnetismo horizontal no asociado con ningún elemento de la plataforma sino, posiblemente, al proceso constructivo de la misma. Por ello, se van a estudiar dos soluciones de compensación. La primera solución se implementará sobre las fuentes de la magnetización. La segunda solución no estará tan localizada y se implementará con una malla de bobinas que compensarán en la zona denominada como crítica, previamente establecida. Esta es la primera vez que se prueba y

desarrolla esta estrategia para la compensación de anomalías magnéticas en campo cercano de estas características en un buque.

Para todos los casos se ha utilizado el software de minimización por algoritmos genéticos desarrollado para la calibración magnética de buques. Usando esta técnica se han obtenido los valores de “Amperio x vuelta” que minimizan simultáneamente la amplitud y el gradiente en la zona [1, 5, 10, 11, 13,14, 19]. La configuración del algoritmo genético ha sido la misma que se seleccionó para la calibración magnética utilizando esta técnica en el capítulo 4:

- Esquema: alfabeto binario de longitud finita.
- Número de individuos: 100.
- Función de escalado: *Truncado sigma inverso* de constante $C=3$.
- Método de Selección: *Tournament*.
- Probabilidad de cruce: 0,6.
- Probabilidad de mutación: $1/\text{Tamaño de la población} = 0,01$.
- Función objetivo: método de *Contención*. Es un método novedoso desarrollado específicamente para la minimización del campo magnético y aplicado por primera vez en este trabajo.

7.7.1. Compensación sobre la fuente

La solución de compensación “sobre la fuente magnética” trata de minimizar la anomalía de la plataforma *PI* actuando sobre el elemento que la produce. En este caso las fuentes magnéticas son los dos motores que controlan los servos de los timones. Dichas magnetizaciones de ambos motores (polos norte y sur invertidos) están posiblemente producidas por el almacenamiento de los mismos en posiciones contrarias respecto a uno de los ejes magnéticos de la tierra. Es decir no ha existido en el almacenamiento ningún protocolo de control magnético que podría haber incluido una desmagnetización previa al montaje.

Para estudiar la efectividad de la compensación de las bobinas se van a seleccionar las filas de la componente *Z* que presenten la forma de un dipolo transversal (ver figura 2.8 del capítulo 3). Las filas seleccionadas han sido desde la 2 hasta la 10, ambas inclusive. En la figura 7.10 se representan entre babor y estribor las filas desde la 2 hasta la 10 agrupadas en un área cuyos extremos, para cada punto, son el valor máximo y el valor mínimo de las nueve filas mencionadas. Como puede verse claramente en la figura, existe una magnetización transversal importante con una diferencia entre máximo y mínimo de 53.640 nT. La zona recuadrada en rojo es dónde este dipolo puede interferir los sensores de rumbo de las aeronaves, y está situada a una distancia de unos 4 metros de los extremos de la zona de cubierta de vuelo de la plataforma *PI* medida en el capítulo 5.

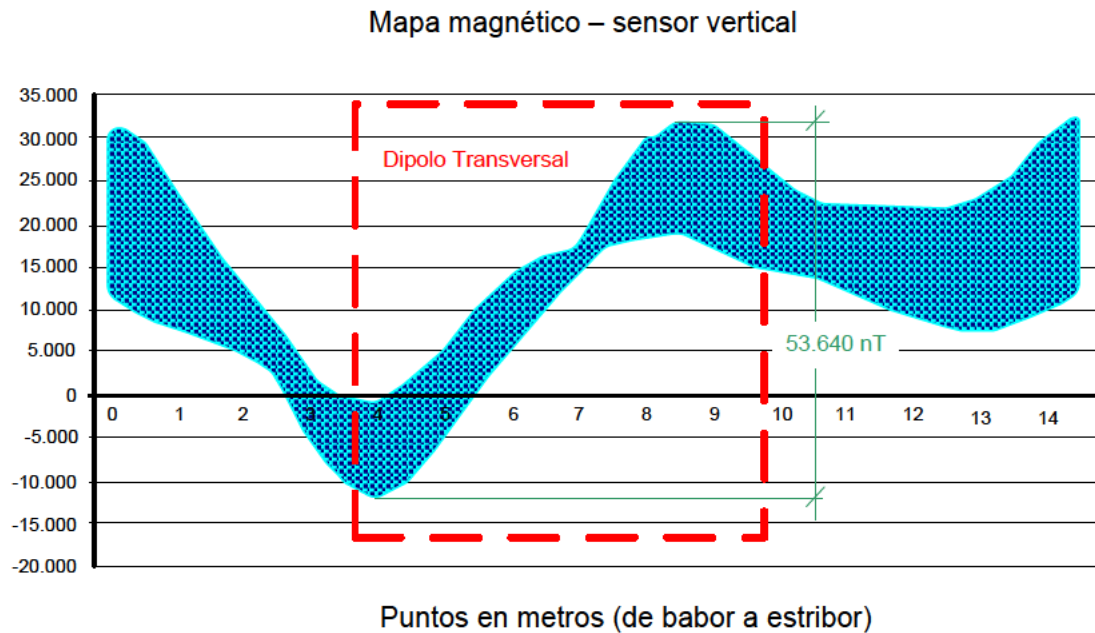


Figura 7.10. Filas 2 a 10 del mapa magnético de la plataforma *P1* componente *Z*.

Debido a que no se pueden bobinar externamente los dos motores, se van a plantear dos formas de compensación. La primera consistirá en situar cinco bobinas transversales entre ambas fuentes en un local situado entre la cubierta de vuelo y los motores. La segunda en situar dos bobinas verticales bajo la cubierta y alimentarlas en contrafase.

El efecto de las bobinas se ha calculado según las fórmulas de campo magnético producido por un hilo finito de corriente. No se han considerado la existencia de elementos ferromagnéticos (cubierta de vuelo, mamparos,...). El sistema de referencia de coordenadas ha sido el mismo que el del mapa magnético, situando el origen en el punto más a babor y más a popa.

El uso de bobinas transversales o verticales en la compensación real de la anomalía dependerá de los inconvenientes de su instalación a bordo. La situación de dichas bobinas puede verse en la figura 7.11.

Bobinas transversales

La primera solución ha consistido en utilizar cinco bobinas situadas según se muestra en la figura 7.11 (color naranja) debajo de la superficie de la Plataforma.

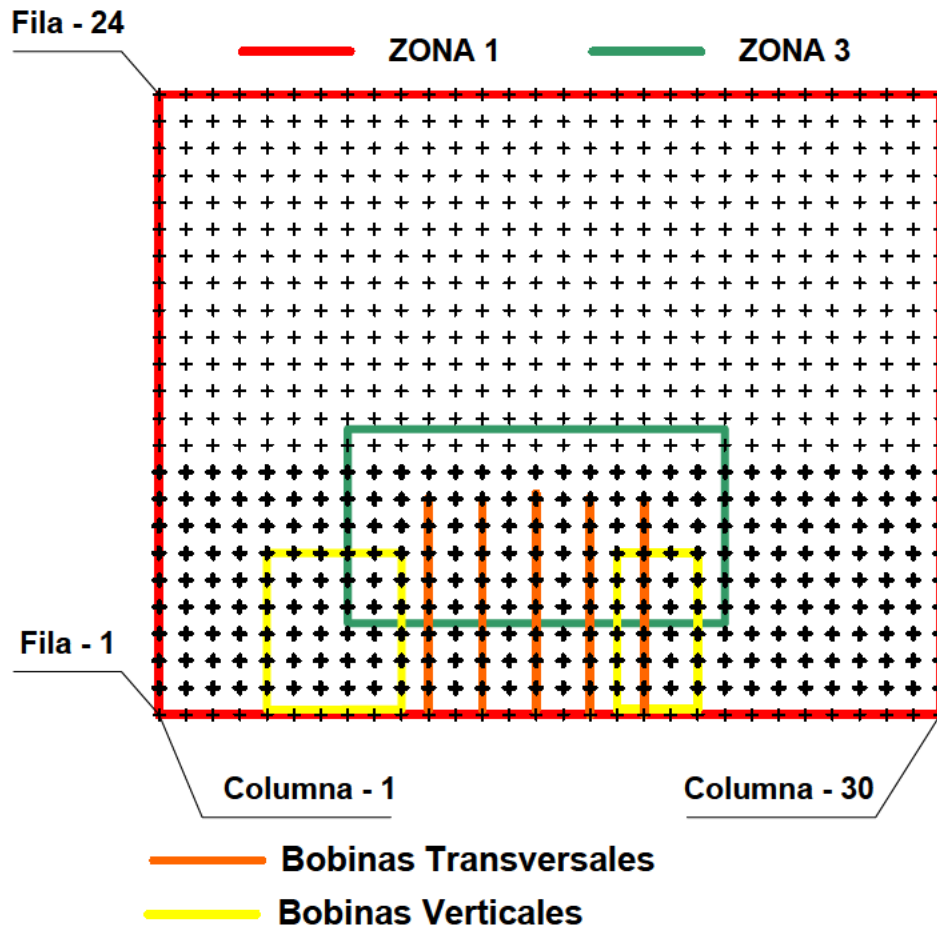


Figura 7.11. Situación de las bobinas transversales y verticales utilizadas para la compensación de la anomalía magnética de la plataforma *P1*.

Las coordenadas de las cinco bobinas transversales utilizadas se muestran en la tabla 7.17.

Tabla 7.17. Situación de las bobinas transversales por coordenadas de los puntos extremos de cada uno de los tramos (en metros).

Bobina 1			Bobina 2		
X'	Y'	Z'	X'	Y'	Z'
5	0	-0,5	6	0	-0,5
5	5	-0,5	6	5	-0,5
5	5	-3	6	5	-3
5	0	-3	6	0	-3
Bobina 3			Bobina 4		
X'	Y'	Z'	X'	Y'	Z'
6,5	0	-0,5	8	0	-0,5
6,5	5	-0,5	8	5	-0,5
6,5	5	-3	8	5	-3
6,5	0	-3	8	0	-3
Bobina 5					
X'	Y'	Z'	X'	Y'	Z'
9	0	-0,5	9	5	-3
9	5	-0,5	9	0	-3

Tras el uso de la herramienta basada en algoritmos genéticos presentada en el capítulo 4, los valores de *Amperio x Vuelta* (*A.V*) que minimizan la anomalía magnética para cada una de las bobinas son:

- Bobina 1= 800 A.V.
- Bobina 2= -600 A.V.
- Bobina 3= 900 A.V.
- Bobina 4= 400 A.V.
- Bobina 5= -100 A.V.

El resultado del campo magnético resultante se muestra en la figura 7.12 con un valor de pico a pico en la zona de interés de 12.675 nT. Se ha conseguido una mejora importante reduciendo el gradiente inicial en un 76% aproximadamente entre las columnas 10 y 20.

Compensación con Bobinas Transversales (Componente-z)

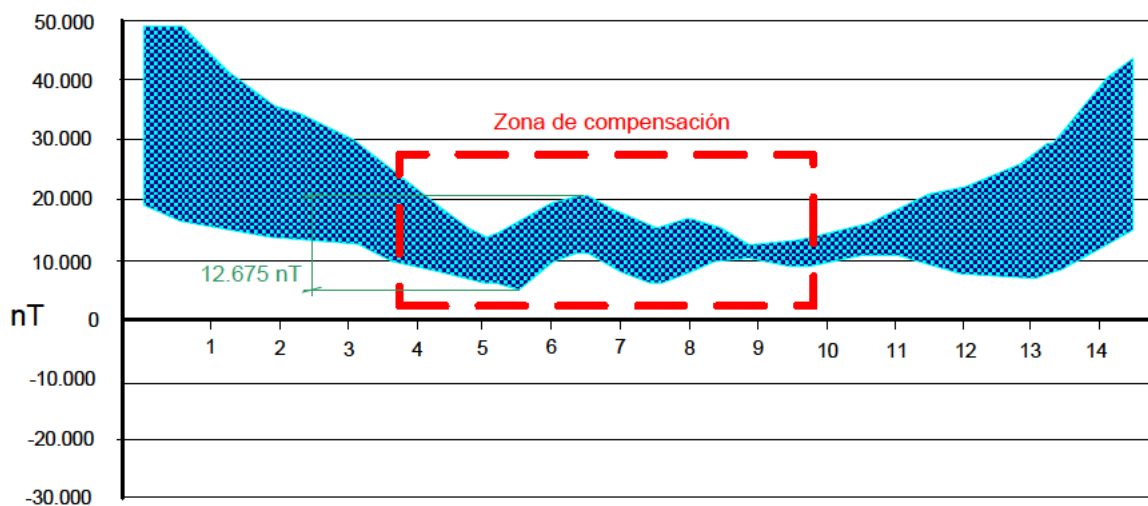


Figura 7.12. Resultado de la compensación en la Simulación1.

Bobinas verticales

La segunda solución propuesta trata de compensar la anomalía con 2 bobinas locales verticales situadas bajo la superficie de la plataforma, a tres metros aproximadamente, según se muestra en la figura 7.11 (color amarillo). Dichas bobinas se denominarán *MBr*, la de más a babor, y *MEr*, la de más a estribor.

La tabla 7.18 muestra los valores de las coordenadas de las bobinas utilizadas y su conversión al sistema de referencia del Mapa Magnético.

Utilizando el software de minimización por Algoritmos Genéticos, los valores de *Amperio.Vuelta* (*A.V*) para cada una de las bobinas son:

- Bobina *MBr* = -2.000 A.V.

- Bobina Mer = 7.000 A.V.

Tabla 7.18. Situación de las bobinas verticales por coordenadas de puntos extremos de cada uno de los tramos (en metros).

<i>MBr</i>			<i>MEr</i>		
<i>X'</i>	<i>Y'</i>	<i>Z'</i>	<i>X'</i>	<i>Y'</i>	<i>Z'</i>
2	0	-4	8	0	-4
2	3	-4	8	3	-4
5	3	-4	10	3	-4
5	0	-4	10	0	-4

El resultado de la compensación de esta configuración de bobinas verticales puede verse en la figura 7.13. El valor de pico a pico en la zona de la perturbación es de 15.331 nT. Se ha conseguido una mejora importante reduciendo el gradiente inicial en un 71% aproximadamente.

Compensación con Bobinas Verticales (componente z)

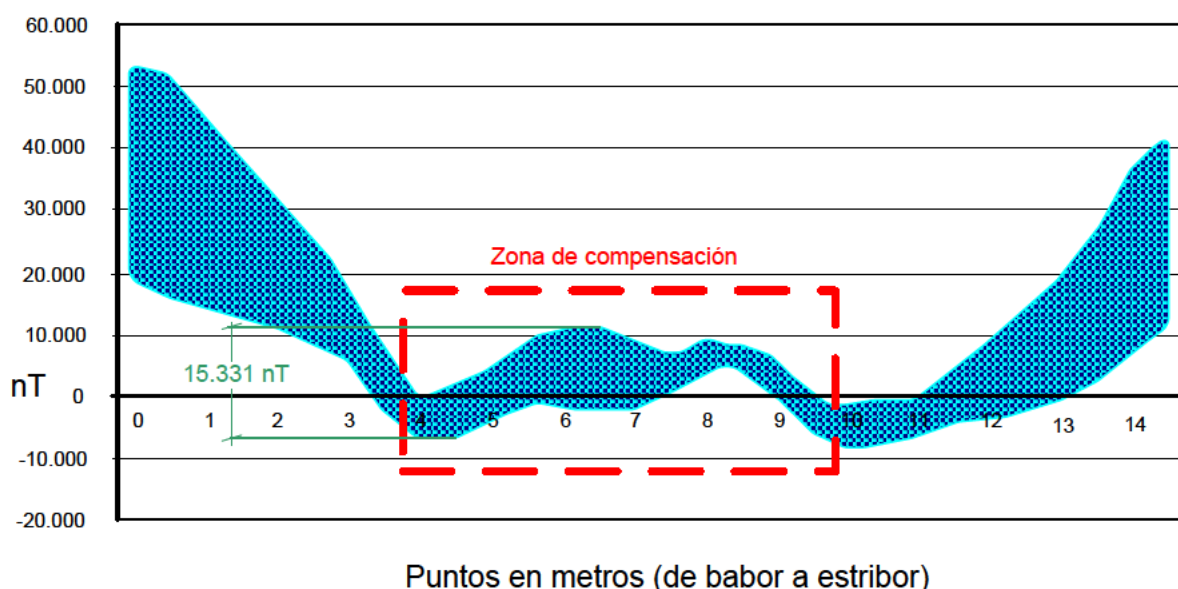


Figura 7.13. Resultado de la compensación de la anomalía magnética en la plataforma *P1* con bobinas verticales.

En un buque el montaje de las bobinas verticales es más fácil de implementar bajo la cubierta por lo que se esta configuración fue la seleccionada para su montaje a bordo.

7.7.2. Compensación sobre la Plataforma

En el caso de la plataforma *P4*, como vimos en el capítulo 6, existe una magnetización transversal débil y otra longitudinal aunque sin efecto de ésta última sobre la anomalía tipo *ADE* detectada. Al igual que en el caso anterior se han seleccionado las filas de la componente vertical del campo magnético medido que presentan la forma de un dipolo transversal según vimos en la figura 2.18 del capítulo 2. En este caso corresponde a las filas situadas entre la fila 10 y 15, ambas inclusive (figura 7.14). Por la imposibilidad de compensar toda la zona y no incrementar en exceso el número de bobinas utilizadas se ha delimitado una zona pequeña *Z5* dónde tiene que ser efectiva la compensación (figura 7.15).

El problema de compensación se resolverá utilizando bobinas verticales (plano horizontal) cuadradas de 1 m de lado de manera que cubran las tres zonas críticas. La distancia a la que se va a compensar el error de rumbo está a 1 metro de la superficie. La solución consiste en situar 15 espiras en un plano horizontal 0,5 metros por debajo de la superficie en las zonas críticas facilitadas por los usuarios de las plataformas. En las figuras 7.15 y 7.16 se pueden ver el esquema con la situación de las mismas.

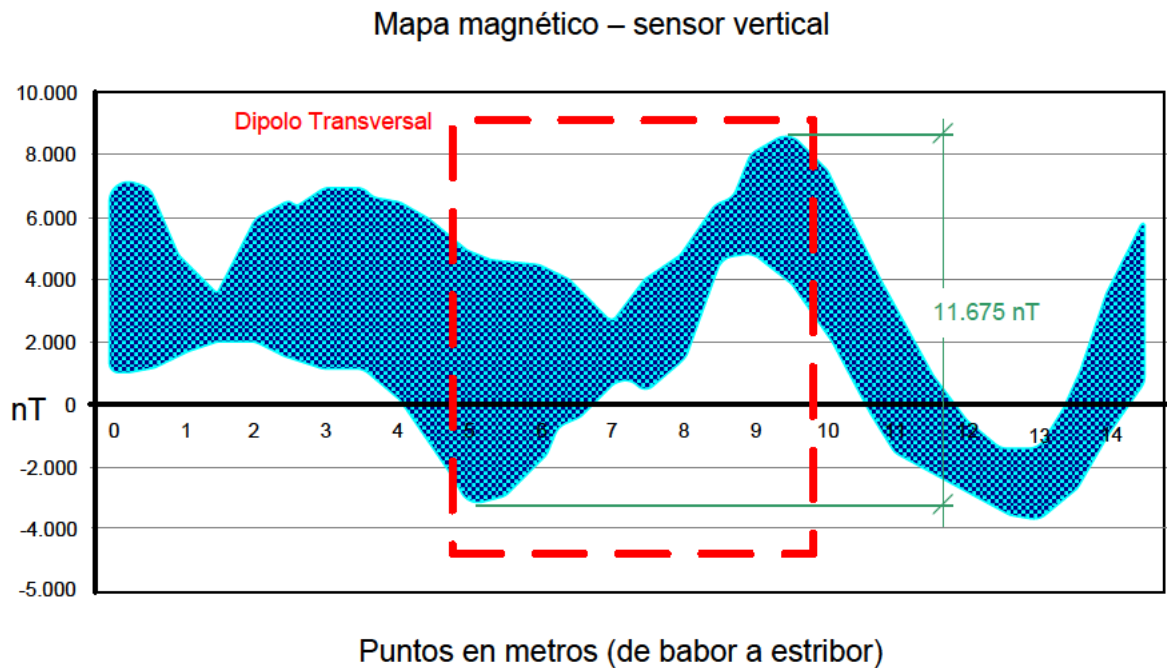


Figura 7.14. Filas 10 a 15 de la componente vertical. mapa magnético de la plataforma *P4*.

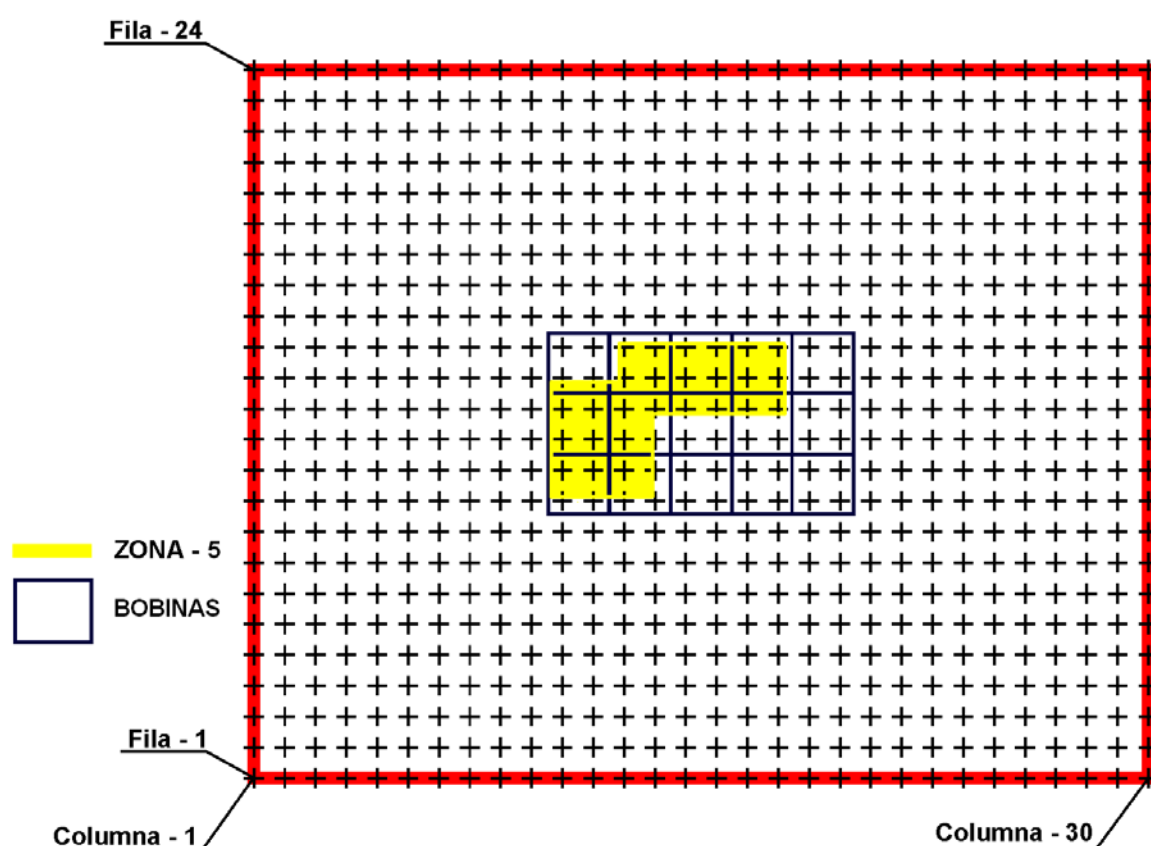


Figura 7.15. Plano de la zona Z5 y la disposición de bobinas verticales de compensación.

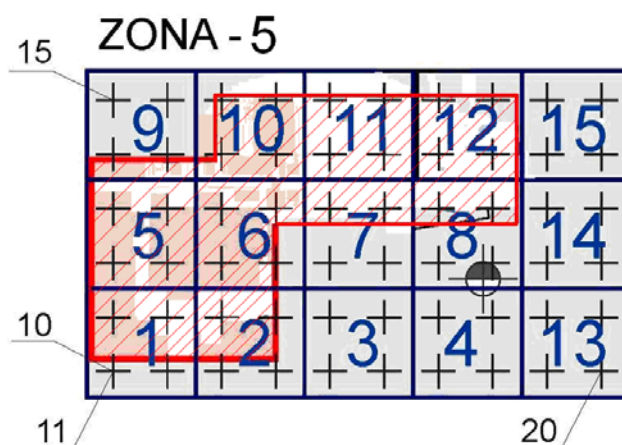


Figura 7.16. Detalle de la situación de las 15 espiras verticales para la corrección del magnetismo permanente horizontal.

Las coordenadas de los vértices de las bobinas comentadas utilizadas para la compensación se muestran en la tabla 7.19.

Tabla 7.19. Coordenadas de situación de las 15 bobinas verticales utilizadas en la compensación de la anomalía magnética Tipo *ADE* (en metros).

M1			M2		
X	Y	Z	X	Y	Z
5,25	4,75	-0,5	6,25	4,75	-0,5
6,25	4,75	-0,5	7,25	4,75	-0,5
6,25	5,75	-0,5	7,25	5,75	-0,5
5,25	5,75	-0,5	6,25	5,75	-0,5
M3			M4		
X	Y	Z	X	Y	Z
7,25	4,75	-0,5	8,25	4,75	-0,5
8,25	4,75	-0,5	9,25	4,75	-0,5
8,25	5,75	-0,5	9,25	5,75	-0,5
7,25	5,75	-0,5	8,25	5,75	-0,5
M5			M6		
X	Y	Z	X	Y	Z
5,25	5,75	-0,5	6,25	5,75	-0,5
6,25	5,75	-0,5	7,25	5,75	-0,5
6,25	6,75	-0,5	7,25	6,75	-0,5
5,25	6,75	-0,5	6,25	6,75	-0,5
M7			M8		
X	Y	Z	X	Y	Z
7,25	5,75	-0,5	8,25	5,75	-0,5
8,25	5,75	-0,5	9,25	5,75	-0,5
8,25	6,75	-0,5	9,25	6,75	-0,5
7,25	6,75	-0,5	8,25	6,75	-0,5
M9			M10		
X	Y	Z	X	Y	Z
5,25	6,75	-0,5	6,25	6,75	-0,5
6,25	6,75	-0,5	7,25	6,75	-0,5
6,25	7,75	-0,5	7,25	7,75	-0,5
5,25	7,75	-0,5	6,25	7,75	-0,5
M11			M12		
X	Y	Z	X	Y	Z
7,25	6,75	-0,5	8,25	6,75	-0,5
8,25	6,75	-0,5	9,25	6,75	-0,5
8,25	7,75	-0,5	9,25	7,75	-0,5
7,25	7,75	-0,5	8,25	7,75	-0,5
M13			M14		
X	Y	Z	X	Y	Z
9,25	4,75	-0,5	9,25	5,75	-0,5
10,25	4,75	-0,5	10,25	5,75	-0,5
10,25	5,75	-0,5	10,25	6,75	-0,5
9,25	5,75	-0,5	9,25	6,75	-0,5
M15					
X	Y	Z	X	Y	Z
9,25	6,75	-0,5	10,25	7,75	-0,5
10,25	6,75	-0,5	9,25	7,75	-0,5

Utilizando el software de minimización por algoritmos genéticos se obtienen los valores de *Amperio.Vuelta* ($A \cdot V$) para cada una de las bobinas. Estos valores se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 7.20. Valores *Amperio.Vuelta* de las bobinas de compensación de la anomalía magnética Tipo *ADE*.

Bobina	$A \cdot V$	Bobina	$A \cdot V$	Bobina	$A \cdot V$
1	136	6	138	11	67
2	128	7	334	12	450
3	48	8	475	13	433
4	274	9	97	14	292
5	99	10	152	15	142

La figura 7.17 muestra el resultado de la compensación de la anomalía tipo *ADE* en la plataforma *P4*. Como puede verse se ha reducido esta magnetización transversal un 33%.

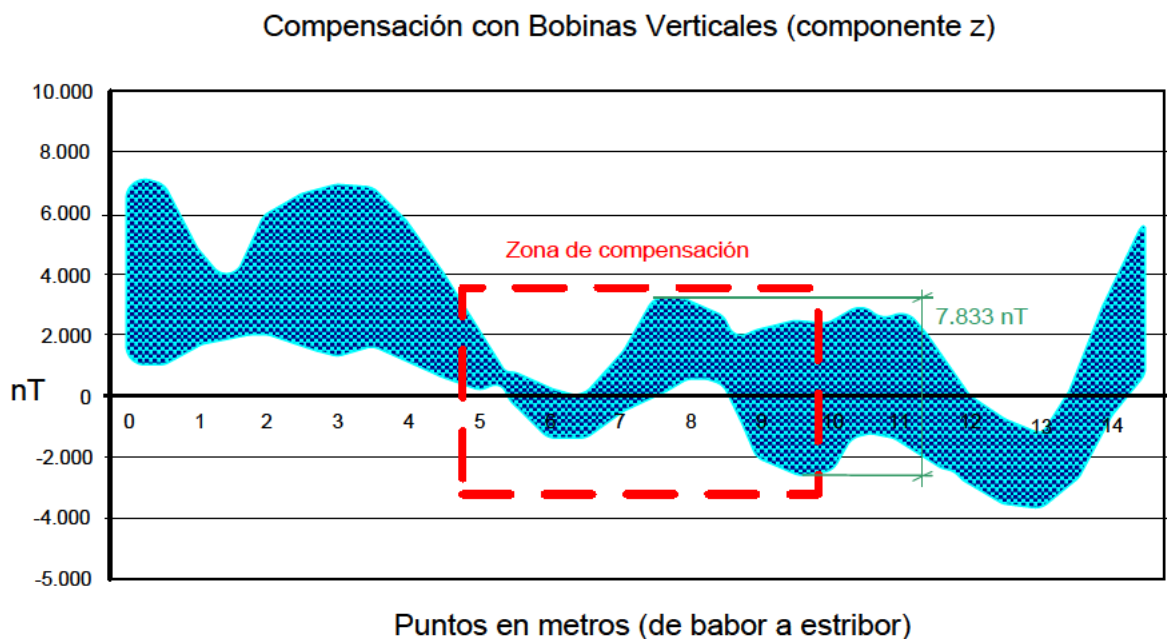


Figura 7.17. Resultado de la compensación de la anomalía tipo *ADE* en la plataforma *P4*.

7.8. Conclusiones

Las anomalías magnéticas locales de plataformas navales que no pueden ser compensadas por los sistemas de desmagnetización pueden corregirse utilizando un bobinas situadas en las inmediaciones del área dónde se produce la anomalía o sobre la fuente que las producen. Habitualmente la solución a este problema ha sido realizar un costoso procedimiento de *deperming* al buque.

Las anomalías magnéticas se han clasificado en dos niveles aparte del estado de ausencia de la misma. Una cubierta de vuelo puede resultar sin anomalías magnéticas (Tipo *SAN*), con anomalías magnéticas débiles (Tipo *ADE*) o con anomalías magnéticas fuertes (Tipo *AFU*).

Este estudio, realizado por primera vez, se ha aplicado a las cubiertas de vuelo de cuatro plataformas navales y se ha tomado una quinta como referencia. En dicha plataforma de referencia se conocía que no existía ningún tipo de anomalía magnética sobre su cubierta de vuelo. Como resultado del mismo se ha concluido que la plataforma *P1* presentaba una anomalía tipo *AFU* producida por una magnetización transversal importante. La Plataforma *P4* presentaba una anomalía tipo *ADE* debido a una magnetización transversal pequeña.

Para la compensación de las anomalías Tipo *ADE* y *AFU*, se ha propuesto por primera vez, el montaje bajo cubierta de un conjunto de espiras de mayor o menor complejidad. Las anomalías Tipo *AFU* son producidas por fuentes muy localizadas, necesitan menos bobinas para su compensación y tienen unas reducciones del orden del 70% del gradiente magnético inicial. Las anomalías tipo *ADE* necesitan más bobinas para su minimización y su reducción es del orden del 30% del gradiente del campo magnético. Este tipo de estudio y la estrategia de compensación es una contribución novedosa del autor al estado del arte en el silenciamiento magnético de buques.

Capítulo 8

Conclusiones de la Tesis y líneas futuras

8.1 Conclusiones

Como principio de esta Tesis se han estudiado las magnetizaciones de buques y la forma de medirlas estableciendo las ecuaciones que rigen la captura de valores magnéticos en una típica Estación de Calibración Magnética (capítulo 1). También quedaron patentes las diferentes fuentes de error que pueden presentarse en la medición de datos magnéticos en una Estación de Medida debidos a las condiciones de navegación (ángulos de balance, cabezada, abatimiento y guiñada). En ningún caso se entró en los errores debidos al ruido propio de la Estación de medida (ruido eléctrico, digitalización, etc.) ya que son inferiores a los errores mencionados anteriormente propios de la navegación en Estaciones de medida *Open Range* (el buque realiza pasadas a velocidad y rumbo constantes perpendiculares a una línea de magnetómetros).

Como complemento a las ecuaciones de medida de la firma magnética del buque debida a las magnetizaciones permanentes e inducidas se estudió en el capítulo 3 las ecuaciones que gobiernan los sistemas de desmagnetización o de *degaussing* de un buque utilizando el modelo de espira rectangular y el modelo de hilo finito de corriente para cualquier configuración geométrica por tramos rectilíneos. Esto último es muy útil para aproximar cualquier tipo de geometría de bobina por tramos. Siempre estas ecuaciones se han estudiado desde el punto de vista de la medida por una Estación de Calibración tipo *Open Range*. En este mismo capítulo se han utilizado tanto de las ecuaciones de las magnetizaciones del buque como las del campo magnético compensatorio que producen las bobinas de *degaussing* para calcular las corrientes de equilibrio. Dichas corrientes son las necesarias que deben suministrarse al sistema de *degaussing* para compensar la firma magnética de un buque producida por sus magnetizaciones, tanto permanentes como inducidas. Esa compensación no es absoluta sino que es la máxima alcanzable y cuya resultante es la firma magnética mínima del buque. La firma magnética compensada representa la perturbación magnética mínima producida por un buque dentro del campo magnético terrestre en el entorno de su posición.

Esa minimización de la firma magnética también se ha estudiado utilizando los algoritmos genéticos y adaptándolos al problema bajo estudio. Fundamentalmente esa adaptación fue la utilización de una función objetivo que trataba de no crear rizados artificiales en torno a la solución ya que esos rizados son equivalentes a la generación de magnetizaciones longitudinales (si es uniforme), combinado con verticales (si no es uniforme) y transversales (en menor medida). De esta forma se consigue algo que una función objetivo tradicional por mínimos cuadrados (mínima energía) no consigue al minimizar una función, que es la minimización simultánea de los valores de pico y del gradiente. Después de estudiar diferentes mecanismos de evolución de los algoritmos genéticos se ha seleccionado el algoritmo genético con escalado *truncado sigma inverso* con factor de escalado $K=3$ y mecanismo de selección *tournament* y función objetivo de *Contención*. En este caso se han conseguido reducciones de hasta un 95% de los valores de pico de la firma frente al 75% utilizando la función objetivo por mínimos cuadrados. También se ha producido una reducción del gradiente de hasta un 75% del inicial de la firma magnética frente a un gradiente que no varía o que empeora cuando se utilizan los mínimos cuadrados.

Todo lo estudiado en los capítulos anteriores permiten analizar la firma magnética medida por una estación de medida tipo *Open Range* y su minimización utilizando métodos avanzados que permiten una minimización más acorde con el estado del arte de los sistemas de armas submarinas existentes actualmente. Como ampliación a estos trabajos se ha querido dejar constancia, como ha sucedido en la realidad, que un sistema de *degaussing* por muy moderno que sea y un método de compensación avanzado no aseguran minimizar localmente el magnetismo o una anomalía magnética local. Esto es debido fundamentalmente a que la anomalía se produce en un área mucho más pequeña que las dimensiones de las bobinas de calibración magnética. Este tipo de anomalías puede tener influencia sobre sensores de tipo magnético como pueden ser los magnetómetros que los helicópteros utilizan para su orientación.

El estudio de esta anomalía local producida por diferentes magnetizaciones del buque una vez descartada cualquier posibilidad de compensación por parte del sistema de *degaussing*, es la que ha centrado la segunda parte de la Tesis. Dicha anomalía se estudió sobre la cubierta de vuelo en cuatro buques de una misma serie y en otro del mismo tipo (Fragata) pero de diferente clase utilizado como referencia del estudio. Este buque de referencia fue necesario ya que en él no existía anomalía magnética que produjera interferencia alguna con los sensores de rumbo de los helicópteros.

Para hacer el análisis de la anomalía magnética local presente en las cubiertas de vuelo de la clase de buques bajo estudio se tuvo que elaborar un sistema completo para captura y mapeado de datos magnéticos. Primero se elaboró un prototipo utilizando magnetómetros procedentes de unas minas de ejercicio en desuso para la Armada. Este prototipo era de un solo sensor y todo el posicionamiento y orientación de los ejes del magnetómetro para cada punto del mallado era totalmente manual. Los valores se medían con un polímetro para cada eje en voltios y eran convertidos a nT según la información dada por el fabricante del sensor (nT/V). Todos esos datos fueron ordenados por filas y columnas según el sistema de referencia magnético del buque (el mismo que el considerado para las orientaciones positivas de las magnetizaciones del buque). También se utilizó un segundo magnetómetro del fabricante *Walker Scientific* tanto para la medida con el prototipo como para su uso como patrón de medida.

Con este primer prototipo manual mono-sensor se levantó el mapa magnético de la cubierta de vuelo del primer buque de la serie (capítulo 5) para la validación del equipo y del procedimiento de medida. Para la evaluación de los datos magnéticos se establecieron varias zonas para el estudio, decidiéndose focalizar dicho estudio en una de las zonas (Z3) fundamentalmente para evitar el efecto borde (discontinuidad de las bandas de babor, estribor y popa) o por dimensiones demasiado pequeñas de la zona no representativas de la anomalía. También se definieron una serie de parámetros diferenciando el estudio por filas y por columnas. Esta diferenciación tiene sentido a la hora de buscar dipolos longitudinales y transversales que puedan producir un efecto sobre sensores de rumbo magnético. Los parámetros definidos pretender cuantificar la anomalía con la finalidad de establecer umbrales para la calificación posterior de las mismas.

Una vez validado el prototipo para el mapeo magnético de la cubierta de vuelo se tenía que automatizar la medida para lo que se diseñó y construyó una plataforma semiautomática para el levantamiento sistemático de mapas magnéticos de cubiertas de vuelos o, en general, de superficies de diferentes geometrías. Se pretendía seguir midiendo el campo magnético a determinada distancia de la superficie de una cubierta de vuelo de los diferentes buques teniendo en cuenta la opinión de los operadores de aeronaves y el problema que tenían para la ejecución de tareas de aterrizaje y despegue en dichas superficies y su comparación con los datos magnéticos medidos. El Sistema de adquisición diseñado disponía de varios sensores magnéticos triaxiales, una unidad de adquisición de datos, sensores de inclinación de dos ejes, medidor digital de distancia recorrida (codificador digital en la rueda), batería de alimentación y ordenador portátil. También se elaboró un software de control para que a partir de una calibración de la distancia según el estado de los neumáticos de las ruedas y la introducción del número de líneas, ancho del mallado y longitud de las misma, sólo necesitara de la acción de un operador moviendo el dispositivo según un sistema de apuntamiento mecánico para levantar en menos de 10 minutos el mapa magnético que con el prototipo inicial se tardaba cerca de 4 horas de trabajo (secciones 5 y 6).

Una vez montado la plataforma de captura multi-sensor y establecido el procedimiento de medida y organización de los datos, se procedió a levantar los mapas magnéticos de otros tres buques (secciones 6). De cada uno de los buques se procedió a realizar una evaluación similar de los datos a la realizada con el primer buque de la serie obteniéndose todos los parámetros necesarios para la cuantificación de las anomalías magnéticas que presentaban. Hay que aclarar que una cubierta de vuelo de un buque de acero es una zona de operación de aeronaves con anomalías magnéticas, por lo que la cuantificación se refiere a aquellos valores de la anomalía que podían ser importantes y que pueden afectar a las operaciones de vuelo.

Cuando se tuvo el mapa magnético de todas las cubiertas de vuelo había que hacer un estudio comparativo entre ellas y con otro buque que sirviera de referencia. Para ello se utilizó un buque del mismo tipo pero de distinta clase. Aunque este buque tenía una cubierta de vuelo más pequeña lo importante era la posición relativa de los sensores de rumbo del helicóptero sobre la misma. Para este estudio comparativo se definieron nuevos parámetros relativos que permitieran cuantificar y comparar las anomalías y al mismo tiempo detectar sólo aquellas anomalías de determinada entidad mediante mecanismos equivalentes a un filtrado paso bajo de los datos. También en este caso se hicieron dos estudios diferenciando los parámetros obtenidos por filas y por columnas. Como resultado final se estableció una clasificación de la anomalía en tres tipos, anomalía fuerte, anomalía débil y sin anomalía. Con la clasificación desarrollada quedó la plataforma *P1* como buque con anomalía magnética fuerte, la plataforma *P4* con anomalía magnética débil y las plataformas *P2* y *P3*, sin anomalía.

Al clasificar las anomalías quedaban dos opciones para su compensación, realizar un procedimiento de desmagnetización de la estructura completa del buque (procedimiento costoso y a realizar en una estación de *deperming*) o compensar dichas anomalías utilizando bobinas instaladas para estos casos (capítulo 7). Se propusieron dos soluciones diferentes, una para anomalías fuertes (anomalía Tipo *AFU*) actuando sobre las fuentes magnéticas, y otra para anomalías débiles (anomalía Tipo *ADE*), actuando sobre la zona de influencia de los sensores de la aeronave.

Los resultados han demostrado que la nueva estrategia planteada, que incluye la adquisición de datos, su parametrización, el procedimiento de análisis y de compensación ha resultado muy eficiente en la compensación de anomalías magnéticas en buques, evitando costosos procedimientos de *deperming*.

8.2. Líneas futuras

Como en todo trabajo de investigación, las distintas líneas tratadas en la Tesis quedan abiertas a futuras mejoras y ampliaciones. A continuación se resumen los principales puntos que merece la pena continuar.

En la elaboración de los modelos magnéticos y su validación podría utilizarse los datos capturados para la elaboración de los mapas magnéticos para corregir dichos modelos. Esto podría realizarse sobre superficies planas más o menos diáfanas (cubiertas o hangares). También podría modificarse el sistema de captación para poder realizar capturas suspendidas en zonas despejadas de materiales. Todo esto podría combinarse con la utilización del sistema de *degaussing* y diferentes corrientes de paso por las bobinas de la zona tratada y sus adyacentes.

Este conocimiento del campo magnético en el interior del buque puede ayudar en la instalación de una serie de magnetómetros dentro del mismo para tratar de minimizar la firma sin tener que usar los servicios de una Estación de Calibración Magnética. Habría que definir el número de sensores y su situación estratégica dentro del buque de manera que una minimización identificada por dichos sensores (en campo cercano) equivaliera a una minimización de la firma magnética en campo lejano. Además sería necesario un modelo magnético de buque que fuera capaz de calcular la firma magnética a cierta distancia bajo la quilla a partir del campo magnético medido por los magnetómetros situados dentro del buque.

Apéndice A

Deperming & Wiping

Cuando la firma magnética es superior a un determinado valor y no puede reducirse más utilizando bobinas de *degaussing*, se recurre a la desmagnetización mediante tratamiento magnético. Existen dos métodos de desmagnetización de firma magnética, el *wiping* para reducir el magnetismo vertical y el *deperming* para reducir el magnetismo longitudinal. En la Tabla A.1. puede verse una comparativa entre ambas técnicas de desmagnetización.

Actualmente la técnica de desmagnetización más empleada es el *deperming* quedando el *wiping* prácticamente en desuso.

En general, el objetivo del *deperming* de un buque es minimizar las componentes magnéticas permanentes longitudinales, transversales y verticales. Sin embargo, hay circunstancias bajo las cuales se dota al buque de un magnetismo vertical de forma deliberada, cuando se va a operar en una pequeña zona con una latitud magnética determinada. En este caso puede magnetizarse el casco con un magnetismo vertical permanente que compense la magnetización inducida vertical en la zona de operación. Esta técnica de *deperming* es llamada flash-*deperming*. También puede aplicarse para generar una distribución de la magnetización vertical permanente consistente con el diseño de las bobinas de *degaussing*.

Tabla A.1. Comparativa entre *deperming* y *wiping*.

Deperming	Wiping
Reduce el magnetismo permanente longitudinal	Reduce el magnetismo permanente vertical
Tramos de cable que rodean al buque transversalmente (de babor a estribor) conectados entre sí formando un solenoide. El espaciado entre espiras es dos tercios de la manga del buque y las bobinas finales de un tercio.	Un cable rodea al buque paralelo a la línea de flotación.
Una corriente continua de unos 4000 amperios atraviesa el solenoide en intervalos de 20 o 30 segundos.	Una corriente directa atraviesa la espira mientras el cable se levanta. El cable se baja con la corriente quitada y el proceso se repite.
La corriente produce un magnetismo longitudinal que	La corriente produce un magnetismo vertical que

atraviesa la quilla.	atraviesa la quilla.
Las <i>Eddy currents</i> (corrientes localizadas generadas debido a las variaciones del voltaje en una parte del buque) se eliminan y se reducen antes de cortar el circuito.	Las <i>Eddy currents</i> no llegan a eliminarse del todo.
Cuando se adquieren las características magnéticas longitudinales se para la corriente.	El campo compensa el magnetismo vertical del campo magnético terrestre dónde se requiere protección máxima.
No existe limitación en el tipo de buque.	Este método no es útil para buques de más de 2000 toneladas.

Un buque de superficie o submarino se desmagnetiza mediante la aplicación de un campo magnético elevado en ciclos positivos y negativos a lo largo de su eje longitudinal que van disminuyendo lentamente de amplitud. Los campos magnéticos de desmagnetización se generan haciendo circular cientos de amperios a través de las espiras de un solenoide montado alrededor del buque. Si los ciclos de campo magnético, llamados disparos, se aplican sobre un campo magnético cero, todas las componentes magnéticas se minimizan. Si durante los ciclos de *deperming* se aplica un campo se producirá un permanente en la dirección de este campo aplicado.

El proceso de *deperming* es fácil de explicar gráficamente usando una curva de histéresis. Supongamos que un buque llega a una estación de desmagnetización con una magnetización longitudinal permanente importante (*PLM*) y se desea reducirla lo máximo posible a cero. Primero, el campo magnético de la Tierra debe ser cancelado de manera que el campo magnético de la zona sea aproximadamente cero. Esto se consigue inyectando una corriente constante al solenoide que haga cero el campo magnético del entorno. Como quiera que las estaciones de desmagnetización se construyen en dirección norte-sur magnéticos, no es necesaria ninguna compensación del campo magnético terrestre transversal. La cancelación del campo magnético vertical de la Tierra se consigue con una bobina horizontal (*z loop*) que se instala sobre la superficie del mar o está incorporada a la estructura de la instalación. Este estado magnético del buque está identificado con un 1 en la curva de histéresis de la figura A.1.

Una vez el campo magnético de la tierra se ha compensado (llevado a cero), se inicia el proceso de *deperming* propiamente dicho. En este ejemplo, el primer pulso magnético se generará inyectando varios cientos de amperios a través de una bobina de espiras *X* que producen un campo magnético a lo largo del eje longitudinal del buque, mientras se mantiene una corriente constante para compensar el campo magnético de la Tierra existente. Cuando se aplica el primer pulso de corriente, la magnetización del buque cambiará y se desplazará al punto 2 de la figura A.1. Este punto sería idealmente el nivel de saturación positiva para un buque de acero. La duración típica de los ciclos de corriente es de un minuto para asegurar que las *eddy currents* debidas a la variación del campo magnético se han disipado y el campo magnético ha penetrado al toda la estructura ferromagnética del buque. Después de aplicar el primer pulso de corriente, las espiras que forman la bobina deben dejarse enfriar durante varios minutos antes de aplicar un nuevo ciclo o disparo.

Para el segundo ciclo se aplica una corriente negativa, de polaridad opuesta a la primera. Este segundo ciclo modificará la magnetización del buque desde el punto 2 al punto 3 como se muestra en la figura A.1. cerca del nivel de saturación negativa del material. Después de

otro tiempo de enfriamiento, el tercer disparo llevará la magnetización del buque al punto 4 que debería ser lo más próximo al punto 2. Todos estos disparos se hacen a la máxima corriente y también se llaman *top shots*.

Después de completar estos tres disparos de corriente, la polaridad del campo de desmagnetización se aplica de forma alternada en ciclos positivos y negativos mientras se reduce paulatinamente su amplitud. En el ejemplo de la figura A.1, se puede apreciar como los sucesivos disparos reducen la magnetización sucesivamente desde los puntos 4 al 5, al 6 y al 7, e idealmente hasta el origen en el punto 8.

En la práctica hay muchas razones para que la magnetización permanente no desaparezca del todo:

- El campo constante aplicado para corregir el campo magnético de la tierra no compense este campo completamente.
- Este campo magnético de polarización sufra variaciones durante el proceso.
- El número de ciclos de corriente sea insuficiente.
- Las amplitudes de los ciclos de corriente se reduzcan demasiado rápido.

Si al final del proceso de deperming la magnetización permanente del buque no cumple con los requisitos exigidos habría que repetir el proceso.

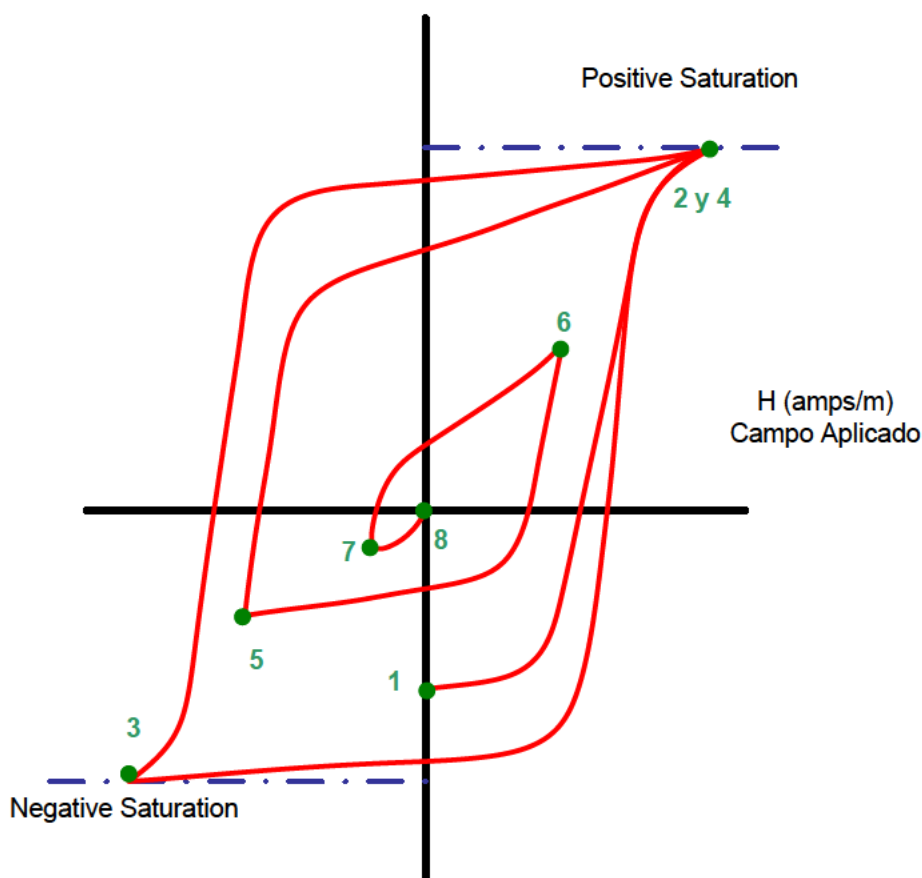


Figura A.1. Evolución curva de histéresis durante procedimiento *deperming*.

En las figuras A.2, A.3, A.4, A.5, A.6 y A.7 se muestran diferentes etapas del deperming de un buque, empezando por la planificación (A.2), preparación de las espiras de corriente en puerto (A.3 y A.4), detalles del bobinado (A.5) y detalles de la interconexión de espiras (A.6 y A.7).

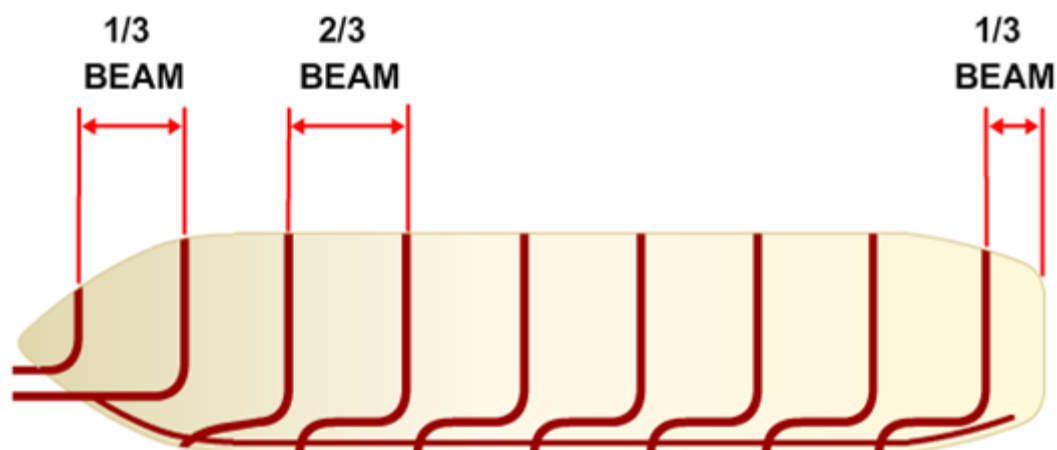


Figura A.2. Esquema de bobinado longitudinal de un buque para someterlo a un *deperming*.



Figura A.3. Tramos de cables para conformar las espiras del bobinado para realizar un *deperming*.



Figura A.4. Preparación en el muelle de los tramos de espiras de una bobina de *deperming*.



Figura A.5. Disposición sobre cubierta de las espiras de una bobina de *deperming*.



Figura A.6. Detalle de los terminales de conexión de las espiras de una bobina de *deperming*.



Figura A.7. Detalle de la conexión de las espiras de una bobina de *deperming*.

Apéndice B

Levantamiento del mapa magnético de una cubierta de vuelo

El levantamiento magnético de una cubierta de vuelo empieza por el marcado de la zona a medir bien sea mediante líneas de recorrido o mediante puntos concretos de medida. En la figura B.1 se muestra un ejemplo de esquema de marcado de 720 puntos con la delimitación de cuatro zonas de estudio. Los puntos se identificarán por el par coordenado *número de fila-número de columna*. En nuestro caso tendrá valores comprendidos entre el elemento (1,1) y el (24,30) y el espacio del mallado es de 0,5 metros.

La figura B.2 muestra el marcado sobre la cubierta de vuelo de la Fragata F-101 “Álvaro de Bazán” de los 720 puntos del mapa magnético para este trabajo. Se utilizó el dispositivo mono-sensor de la figura B.3 para leer el campo magnético en cada uno de los puntos.

Como evolución del procedimiento de medida se diseñó y construyó un segundo equipo de medida multi-sensor (figura B.4) para realizar los mapas magnéticos del resto de buques que se han utilizado en este estudio. La reducción del tiempo preparación de la superficie (marcado de puntos) y de toma de datos fue considerable.

En la figura B.5 se muestran las pruebas realizadas según se propuso en el capítulo 7 para la eliminación de la anomalía tipo *AFU* en la plataforma *PI* mediante el bobinado de las fuente magnéticas con bobinas verticales.

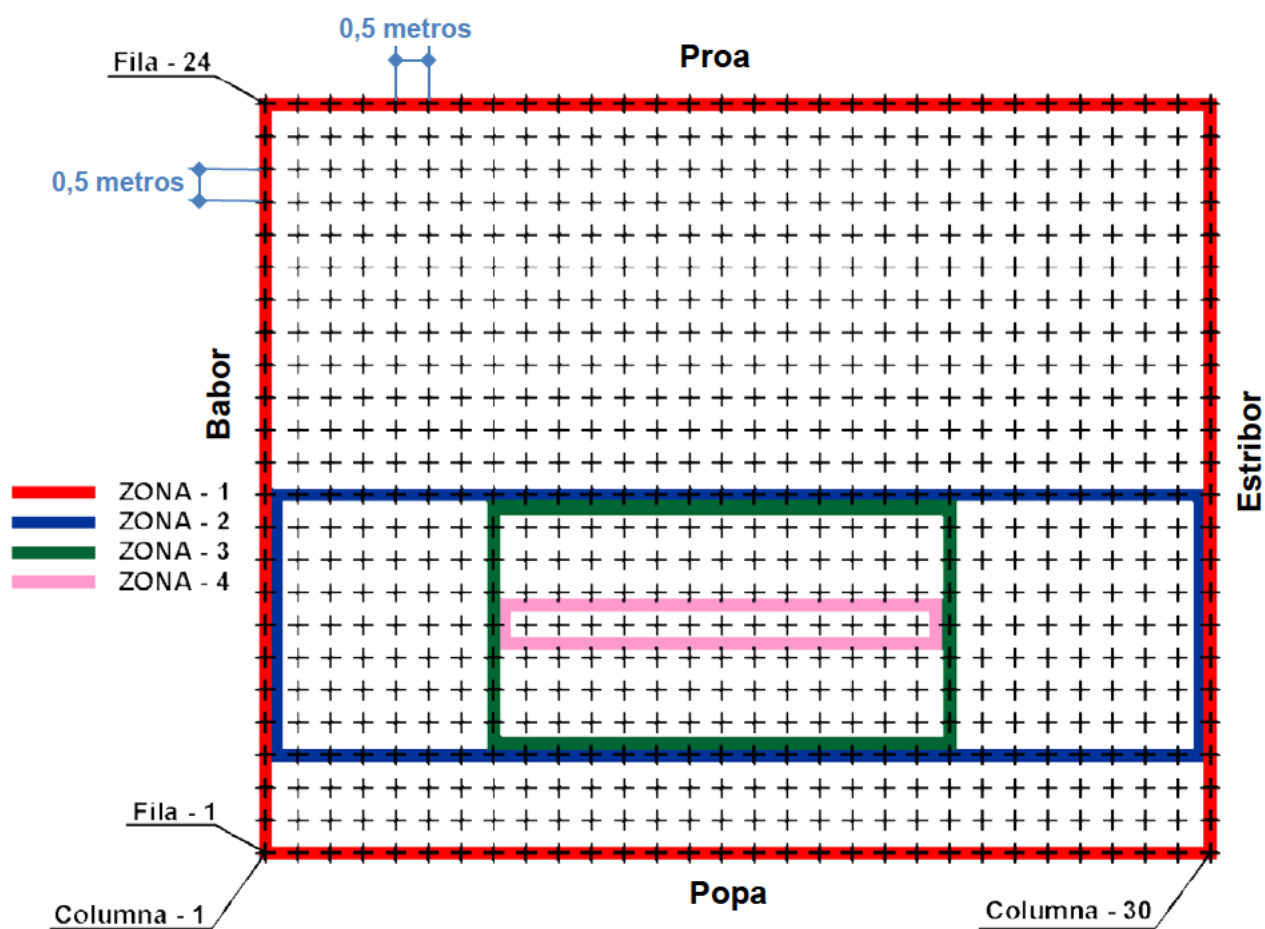


Figura B.1. Esquema del mallado fino en las Plataformas medidas.



Figura B.2. Marcado de la matriz de 30 x 24 puntos de medida sobre la cubierta de vuelo de la plataforma *P1*.



Figura B.3. Muestreo con dispositivo mono-sensor sobre la cubierta de vuelo de la plataforma *P1*.



Figura B.4. Muestreo con dispositivo multi-sensor sobre cubierta de vuelo de plataforma P2.

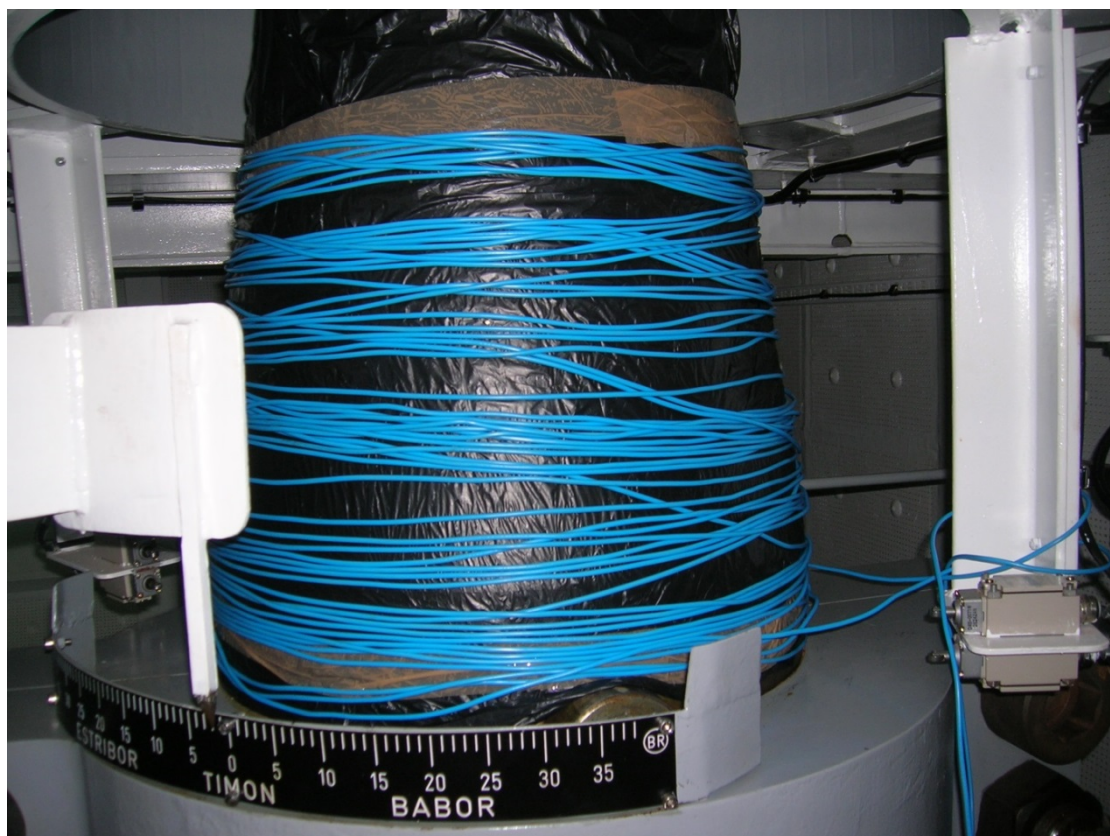


Figura B.5. Bobinado de una fuente magnética bajo la cubierta de vuelo de la plataforma P1.

Apéndice C

Características técnicas de la electrónica del sistema de medida multi-sensor

En este apéndice se listan las características técnicas de la tarjeta de adquisición de datos, del sensor magnético Tipo 1, sensor de inclinación y *encoder* digital utilizados para el levantamiento automático de mapas magnéticos de cubiertas de vuelo.

Tarjeta de adquisición (figura C.1):

DAQPad-6016 de Nacional Instruments.
Bus de conexión a PC: USB.
Entradas analógicas: 16 Single-ended ó 8 differential.
Resolución entrada: 16 bits.
Máxima velocidad de muestreo: 200 Kbps.
Margen de entrada: $\pm 0,05$ a ± 10 .
Salidas analógicas: 2.
Resolución de salida: 16 bits.
Velocidad de salida: 300 S/s.
Margen salida: ± 10 .
Entradas/salidas digitales: 32.
Contadores / temporizadores: 2.
Alimentación: ± 12 V.

Sensor magnético Tipo 1 (figura 5.1):

Fabricante: Thomson.
Modelo: TSM 3202.
Alimentación: ± 12 V.
Consumo: ± 25 mA.
Sensibilidad magnética por eje: 4.950-5.050 mV.
Margen de medida: ± 60.000 nT.
Frecuencia de corte a 3 dB: 10 Hz.

NI DAQPad-6016 (para USB)



Figura C.1. Tarjeta de adquisición de datos externa NI DAQPad-6016.

Encoder digital (figura C.2):

Fabricante: Microtech Laboratory Inc.

Modelo: MAS-42-4096-G5-K4.

Alimentación: 12 VDC.

Consumo: 100 mA.

Lógica: negativa.

Resolución: 12 bits.

Circuito de salida: NPN colector abierto.

Código binario de salida: Gray.

Revoluciones máximas: 6000 min⁻¹.

Frecuencia máxima de respuesta: 10 KHz.

Temperatura de trabajo/humedad: -10°C a 70°C / <95% HR.

Sensor de inclinación (figura C.3):

Fabricante: Crossbow Technology, Inc.

Modelo: CXTA02.

Ejes: X, Y.

Rango angular lineal: $\pm 20^\circ$.

Rango angular completo: $\pm 75^\circ$.

Resolución angular: 0,05° rms.

Sensibilidad pequeños ángulos (mV/°C): 35 \pm 2.

Deriva de la sensibilidad (°/°C): 0,01.

Voltaje ángulo cero (Volts): 2,5 \pm 0,15.

Deriva ángulo cero (mV/°C): 1,0.

Deriva ángulo cero (°/°C): 0,03.

Ancho de banda (Hz): 50 Hz.

Tiempo de establecimiento (seg): 0,2.

Alineamiento (°): ± 1 .

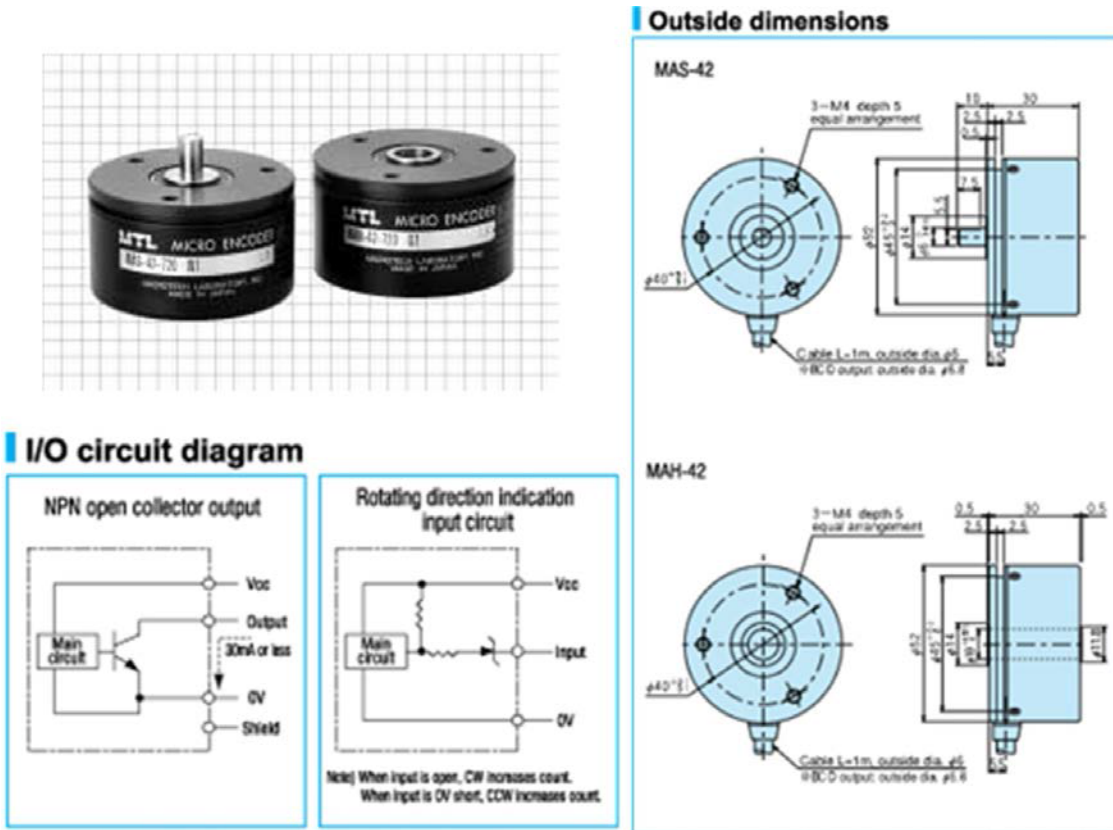


Figura C.2. Encoder digital MTL MAS-42-4096-G5.

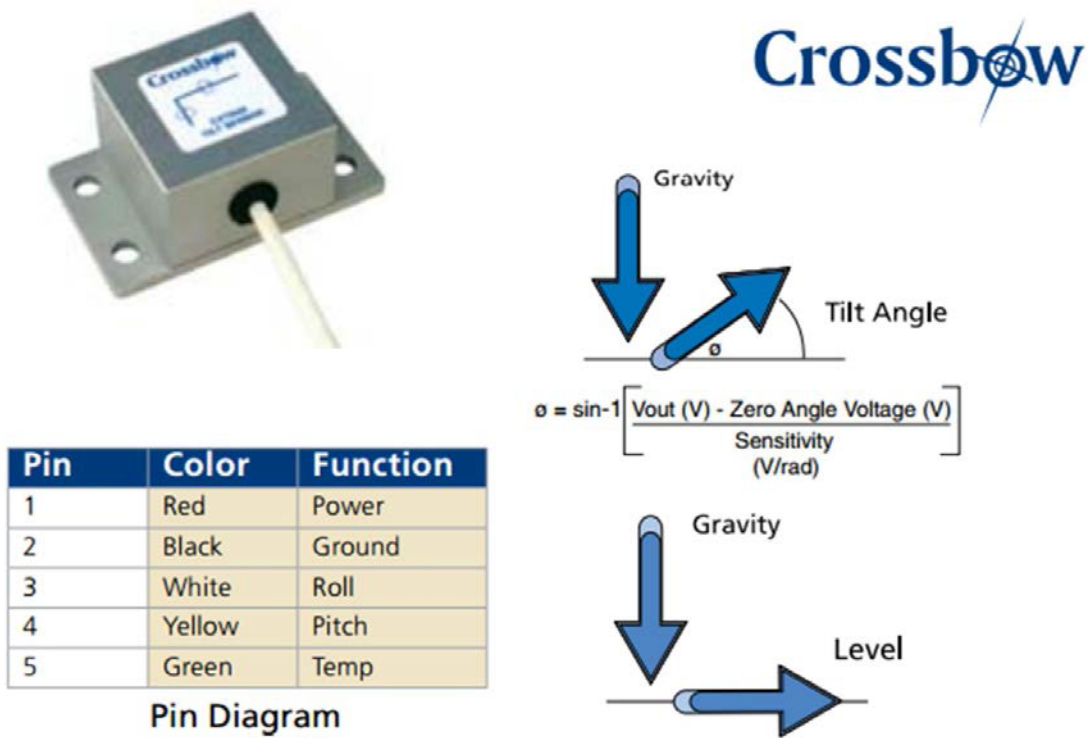


Figura C.3. Sensor inclinación CXTA02 Crossbow Technology.

Apéndice D

Tablas de datos de los mapas magnéticos

En este apéndice se adjuntan las tablas de datos medidas por los sistemas de captura de datos mono-sensor y multi-sensor. Son las siguientes:

1. Ejemplo de formato del fichero *ASCII* capturado por el dispositivo multi-sensor e importado a *Excel*.
2. Tabla de datos de la componente *X* del mapa magnético de la plataforma *P1*.
3. Tabla de datos de la componente *Y* del mapa magnético de la plataforma *P1*.
4. Tabla de datos de la componente *Z* del mapa magnético de la plataforma *P1*.
5. Tabla de datos de la componente *X* del mapa magnético de la plataforma *P2*.
6. Tabla de datos de la componente *Y* del mapa magnético de la plataforma *P2*.
7. Tabla de datos de la componente *Z* del mapa magnético de la plataforma *P2*.
8. Tabla de datos de la componente *X* del mapa magnético de la plataforma *P3*.
9. Tabla de datos de la componente *Y* del mapa magnético de la plataforma *P3*.
10. Tabla de datos de la componente *Z* del mapa magnético de la plataforma *P3*.
11. Tabla de datos de la componente *X* del mapa magnético de la plataforma *P4*.
12. Tabla de datos de la componente *Y* del mapa magnético de la plataforma *P4*.
13. Tabla de datos de la componente *Z* del mapa magnético de la plataforma *P4*.
14. Tabla de datos de la componente *X* del mapa magnético de la plataforma *PREF*.
15. Tabla de datos de la componente *Y* del mapa magnético de la plataforma *PREF*.
16. Tabla de datos de la componente *Z* del mapa magnético de la plataforma *PREF*.

Tabla D.1. Formato de fichero ASCII capturado por el software de captura automática.

Posición	Giro Eje X (°)	Giro Eje Y (°)	M1X	M1Y	M1Z	M2X	M2Y	M2Z	M3X	M3Y	M3Z	Giro Eje X (V)	Giro Eje Y (V)
0,649	-4,042	-2,94	0,457	1,805	3,575	0,373	1,989	3,418	0,321	1,906	3,672	2,535	2,351
0,92	-3,212	-0,085	0,543	1,7	3,563	0,46	1,883	3,384	0,382	1,808	3,633	2,548	2,41
1,164	-3,408	-1,023	0,599	1,538	3,616	0,509	1,704	3,452	0,432	1,642	3,685	2,617	2,41
1,405	-2,976	-0,229	0,603	1,432	3,729	0,518	1,59	3,575	0,457	1,537	3,803	2,435	2,5
1,695	-1,374	0,278	0,61	1,373	3,914	0,545	1,561	3,766	0,495	1,499	3,957	2,617	2,447
1,949	-5,272	2,273	0,614	1,356	4,071	0,567	1,548	3,925	0,532	1,478	4,096	2,54	2,579
2,155	-5,871	3,909	0,588	1,389	4,181	0,554	1,583	4,039	0,545	1,51	4,209	2,637	2,54
2,461	-2,475	0,619	0,635	1,491	4,298	0,631	1,705	4,126	0,623	1,633	4,276	2,558	2,368
2,734	-4,499	-0,188	0,663	1,548	4,385	0,68	1,771	4,192	0,687	1,719	4,312	2,515	2,592
2,905	-9,615	0,353	0,71	1,624	4,428	0,739	1,851	4,205	0,76	1,802	4,294	2,573	2,517
3,21	-2,614	0,612	0,708	1,726	4,483	0,763	1,975	4,205	0,777	1,904	4,229	2,552	2,36
3,47	-1,6	-1,118	0,71	1,767	4,515	0,763	1,986	4,188	0,772	1,899	4,194	2,61	2,455
3,68	-5,349	-1,386	0,735	1,789	4,537	0,807	1,982	4,198	0,817	1,844	4,18	2,664	2,446
3,941	-0,662	-0,27	0,841	1,844	4,529	0,901	1,99	4,157	0,895	1,802	4,152	2,485	2,459
4,168	0,71	1,53	0,817	1,87	4,517	0,872	1,983	4,167	0,874	1,772	4,183	2,455	2,45
4,417	-3,043	-0,376	0,818	1,841	4,515	0,857	1,93	4,206	0,872	1,692	4,264	2,361	2,394
4,721	-1,242	-0,354	0,814	1,902	4,486	0,818	1,99	4,22	0,855	1,739	4,336	2,599	2,209
4,972	-2,004	1,663	0,729	1,909	4,472	0,699	2,014	4,25	0,74	1,761	4,416	2,577	2,493
5,225	-4,552	-1,222	0,749	1,878	4,434	0,671	2,021	4,246	0,695	1,763	4,457	2,778	2,452
5,411	-0,94	-1,996	0,796	1,893	4,388	0,671	2,05	4,194	0,679	1,812	4,443	2,523	2,303
5,664	-3,608	1,647	0,809	1,94	4,365	0,656	2,105	4,149	0,619	1,869	4,419	2,59	2,506
5,917	-5,957	-1,879	0,808	1,93	4,326	0,615	2,084	4,123	0,576	1,88	4,42	2,485	2,43
6,196	-5,33	-0,767	0,902	1,913	4,263	0,665	2,03	4,041	0,587	1,832	4,354	2,502	2,332
6,421	-2,816	-2,662	0,935	1,907	4,237	0,701	2,018	4,026	0,626	1,83	4,328	2,646	2,437
6,666	-1,796	-6,539	0,83	1,825	4,26	0,606	1,91	4,076	0,536	1,73	4,373	2,581	2,357
6,918	-4,693	-3,526	0,847	1,794	4,258	0,639	1,871	4,09	0,575	1,684	4,377	2,649	2,46
7,221	-0,195	-5,403	0,762	1,774	4,315	0,588	1,842	4,172	0,547	1,635	4,455	2,461	2,349
7,473	-4,954	-4,764	0,628	1,739	4,355	0,481	1,796	4,255	0,456	1,58	4,554	2,732	2,296

Tabla D.2. Datos mapa magnético plataforma *P1* componente *X* (nT).

Y/X	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5
0	16920	8760	1080	-2280	-3840	-3600	-840	6120	15120	25560	31320	33000	33840	32640	31080	31680	29400	21960	12480	7200	5640	6120	7920	8880	9600	10440	11640	12480	8640	0
0,491	18360	7440	-840	-3600	-4680	-4080	-1800	4560	13080	24120	31680	34200	34800	35040	34560	34440	30480	21720	11520	6120	4800	5400	7080	7800	8280	9240	10200	11040	8760	360
0,988	15840	6120	-1320	-3120	-3480	-3000	-1440	3720	12480	24240	31440	34080	34800	36000	36240	35520	30000	20640	11520	6000	4080	4800	6240	6240	6840	7680	7560	8400	7320	1560
1,491	13440	4680	120	-1320	-1800	-1800	-120	4560	13560	25200	31800	33840	34800	35640	36600	35160	28440	18600	10080	5400	3600	3600	4680	4560	5640	6000	5760	6000	6480	3120
1,974	11640	5160	1680	120	-960	-360	-2040	6840	15600	26280	31920	33720	34320	34920	35280	33840	26520	15840	8160	4800	3480	3000	3360	3600	4200	4800	4800	5880	7200	5400
2,481	11280	6000	3000	1800	1320	2400	3840	9360	16920	27000	31920	33360	33240	33480	33240	31680	24600	13320	6600	4200	3600	3240	3000	2520	3000	3960	5160	6720	8400	7080
2,992	11400	7200	4920	3840	4080	5040	6960	11280	18480	27480	30960	32040	32040	31560	30240	27960	21720	12000	6120	4440	4560	4200	2880	2040	2640	4080	5880	7800	9240	7920
3,472	11640	8520	6840	6360	6840	7200	9120	12960	19680	26880	30240	31560	30720	28560	25680	23280	18480	11640	6960	5400	6000	4920	2880	2520	3720	5040	6600	8520	9240	7800
3,999	11400	10200	9120	8520	8760	9480	11400	14520	20160	27240	30600	31200	28680	24600	20880	18720	15480	11280	7800	6720	7080	5520	3960	3960	4920	5880	7080	8760	8880	7440
4,506	11040	11040	10800	10800	11040	11760	12000	16560	21720	28320	31200	30720	25920	20160	16080	14280	12480	10080	8400	8520	8280	6960	5640	5520	6360	7080	8040	9120	8520	7080
4,971	10680	11280	12120	12120	12360	12960	14760	18000	22800	27960	31200	28920	23160	17040	12240	10320	9000	8640	9600	10440	9720	8520	7440	7200	8040	8640	9600	10320	9480	7440
5,493	11040	10560	12120	12480	12480	13680	15480	18240	21360	25920	29280	27000	21360	16560	10920	8040	6960	7800	10440	11880	11520	10560	9600	9000	9360	10080	11280	11880	11040	8400
5,969	10800	9840	11520	12480	12600	13680	15840	17400	19680	23160	26040	24360	20520	17400	11520	8160	7320	8280	10200	12000	12960	12360	11280	10440	10560	11400	12960	13800	12360	9720
6,497	10680	8640	9960	12000	12720	13800	15360	16560	18480	21120	22200	21480	20040	17640	12240	9120	8760	9720	10680	11640	13560	13560	12360	11400	11880	12720	14640	15480	14160	10680
7	10080	7080	8400	10800	12480	13680	15120	16080	18720	20760	19320	18960	19440	17040	12480	9720	9960	10560	11280	11760	12960	13440	12480	12120	13080	14160	16080	16800	15000	11760
7,497	8760	5760	7080	9480	12000	13440	14520	15240	18960	21360	19560	18360	19800	17040	12360	10080	10200	10440	11280	12120	12600	12480	12000	12720	14040	15720	17160	18000	16200	12480
7,956	7920	6120	7440	9840	11760	13200	13680	14520	18480	20640	18480	19200	21360	18240	12720	10200	9480	9480	11040	11760	12240	11640	11520	12720	14520	16440	18120	18480	16920	13800
8,475	8760	8520	8760	10920	11520	12120	12360	12960	16920	18480	18240	20640	23280	19800	14640	11040	7800	7800	9120	10920	11160	10920	11520	13080	15240	17400	18840	18840	17280	14640
8,997	11160	10440	10920	12240	10920	11040	11040	11520	15360	17520	18000	21000	24720	21960	17040	11520	6000	5760	7080	9240	10200	10560	12000	14280	16200	18120	19440	18960	17520	15000
9,479	12360	11280	11880	12480	10200	9000	9480	11160	15120	17880	18960	20880	24720	23040	18480	11520	5280	4560	6000	8160	9120	9960	12360	15600	17400	18480	19800	19320	17760	14760
9,956	12360	10920	11520	11160	9000	8040	8760	10920	15240	18720	19560	21120	23280	22440	17640	11400	6960	5160	6360	8040	8640	9960	12600	16200	18120	18600	19320	19080	17400	14040
10,49	11280	9720	9960	8880	7680	8040	9000	11400	15840	18960	19320	20400	22920	22560	18360	12000	8520	7320	8280	8880	9240	10920	12240	15240	17640	18000	18120	18360	17280	14040
10,964	9720	7800	7680	6960	7200	8640	9960	13320	16200	18120	18600	19200	21480	21840	19200	14280	10800	10440	10680	11160	11520	11280	10800	13200	16440	17400	17280	18120	17400	14400
11,508	8400	6000	5760	6240	6840	9240	11640	15120	15840	16680	17640	18480	19680	20880	20400	18000	15000	14040	13680	14400	14520	11160	9120	11040	15120	16920	17280	18120	17880	14640

Tabla D.3. Datos mapa magnético plataforma *P1* componente *Y* (nT).

Y/X	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5
0	31800	31920	30240	28080	26040	24000	21840	19680	16800	15240	15240	16680	18120	20760	24720	28440	31440	33240	32880	31800	30480	29160	28440	27720	27240	25560	24840	24480	25080	25800
0,491	27720	26880	25440	24840	25080	25440	25800	24720	22920	21120	19920	20400	20400	21000	23640	25800	27480	27240	27120	26880	26400	25800	25560	24960	23400	21960	20160	17880	16560	16680
0,988	19440	17160	17400	18840	20160	21840	22800	23040	23160	23400	23760	23520	22920	22680	23400	23880	23640	22680	21840	21720	21600	21120	20160	18720	17160	15840	13920	11640	9600	9720
1,491	12480	11280	12360	14280	15480	16680	18240	20160	21840	23280	24000	24240	23640	23760	22920	22440	21000	19440	17520	16440	16320	15600	14520	13080	11880	10320	9240	7920	7320	8280
1,974	9840	9600	11040	12720	13920	15720	18240	20520	22200	23520	24240	24000	23160	22080	21120	19320	18000	16080	13920	12720	12480	12240	11760	11040	9840	8520	7440	7560	8400	9840
2,481	8880	9480	10920	12480	14640	17520	20160	22200	23880	24600	24480	23640	22560	21120	19200	16320	14040	12480	10920	10320	10800	11520	11640	11160	10200	9480	9600	10200	11280	12240
2,992	9240	9960	11520	13920	16320	18960	21360	23400	24960	25200	24960	24360	22440	20400	17520	13440	9720	8280	8160	8880	9840	11040	11520	11280	11400	12000	12600	13320	13920	14160
3,472	9960	10680	12720	15000	17400	19680	21840	23640	25080	25200	24960	24480	22560	20640	16320	11640	7560	6000	6960	8160	9480	10560	11160	12000	13080	14040	14880	15240	15360	15000
3,999	10920	11640	13200	15240	17520	19680	21720	23760	25200	25320	26160	26040	24000	21360	16200	11400	7560	6240	6120	7320	9000	9960	11160	12720	14040	15240	15960	16320	16440	15960
4,506	11760	11880	13080	14880	16680	18360	20520	22200	23760	24600	25200	24120	23160	19680	15600	11520	7200	4680	4440	6000	7680	8880	10560	12360	13800	15360	16920	17880	18480	18120
4,971	14280	14040	14400	15360	16080	17040	18240	19200	19920	19200	18240	17640	15120	13320	11400	8760	5280	3000	3120	4800	6600	8520	10440	12600	14040	15480	17160	18600	19920	20880
5,493	17880	17520	16920	16800	16920	16920	17280	17040	16200	13200	11280	9120	6840	7080	7680	6600	5640	5280	5040	5520	6840	9120	10920	12840	14160	15240	16920	18720	20640	22200
5,969	19440	18840	18000	17160	17160	17400	17040	16680	15480	13080	10080	6360	4800	4680	6000	6720	7680	8760	9000	8760	8880	10320	11880	13080	14280	15600	17040	18720	20400	21840
6,497	20520	19920	18600	17160	16800	16920	17040	16320	16080	15360	13080	9720	8040	7560	7680	8160	9240	10800	11640	12000	11640	11880	12360	13200	14040	15600	17160	18600	19920	20880
7	22560	21240	19440	17640	16680	16560	16320	15960	15840	16200	15960	13920	12480	12240	12360	12600	12960	13320	13680	14160	14160	13560	13080	13200	14040	15600	16920	18240	19320	20040
7,497	21600	20880	20280	19560	18960	18480	17880	17280	15960	15840	16080	15720	16080	17160	17400	17160	17280	16800	16440	16320	15960	15360	14400	14040	14520	15480	16680	17280	17880	19200
7,956	18360	19560	21240	22200	22320	21720	20640	19320	17760	16320	15120	16320	17880	19320	20760	21720	21120	19560	18120	17040	16320	15720	15120	15120	15240	16080	16920	17160	17640	18720
8,475	18600	20640	22800	24480	24720	24000	22800	21600	19560	18000	16440	16800	18000	20040	22800	24480	23760	21480	19440	17520	16560	15840	15600	16080	16800	17640	18360	18720	18840	19320
8,997	21600	23040	24360	25560	25800	24240	22920	21600	20520	19920	19680	20040	19920	21120	23280	24960	24360	22320	20640	19080	17880	17040	17040	17880	19080	19680	20400	21120	21000	21480
9,479	23880	24120	24600	24600	24240	22680	21240	20400	20160	20640	21840	22920	21480	21000	21240	21360	22200	22920	22320	21720	20760	19920	19560	20280	21360	21840	21960	21960	22080	21960
9,956	23880	23520	23040	21120	19800	19080	18840	18720	18960	19440	20160	20040	19080	18960	19080	18720	20040	21840	23160	23760	23640	23640	23640	23400	23400	23640	23040	22080	21840	21480
10,49	21360	20400	18840	16320	15000	14640	15480	16440	17160	17400	16800	16080	14640	14040	14760	15840	17640	20040	22320	24360	25920	27240	27240	25680	24240	23640	22680	21720	21480	21720
10,964	17880	16680	14400	12360	11640	12000	12960	15000	16080	15360	14040	13440	11520	9840	9720	12240	15840	18960	21960	24840	27960	29640	28560	26160	24600	23520	23040	22560	23160	23760
11,508	17880	16560	14640	14040	14040	14160	15240	16440	17160	15480	14640	13440	12240	11160	11880	14040	18360	21960	24960	27720	30360	31800	31320	29880	28200	27000	27000	27480	27240	28080

Tabla D.4. Datos mapa magnético plataforma *PI* componente Z (nT).

Y/X	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5
0	73680	72960	66600	58560	50280	40680	30480	23160	20520	23640	32040	39840	47520	54360	58800	64560	72360	78960	78600	73800	69360	66120	64200	64560	65160	67080	69840	74760	81720	85560
0,491	81120	80400	72600	63480	54240	45720	36120	27960	22920	23520	30480	38640	45840	52440	59280	67440	77400	83880	83280	78120	72960	69240	68160	68400	68520	69360	71160	75240	81120	85440
0,988	84240	81240	72120	63840	56520	49680	41280	32160	26280	26520	32520	40320	46440	52680	59880	69360	79200	84120	83640	79200	74520	70920	70080	69960	69000	69480	69960	71520	75000	78600
1,491	80040	74640	66960	60360	54000	48360	40440	32400	27240	28560	35280	42720	48600	54360	61560	71160	80160	83640	82200	77880	73560	69960	68160	66840	65520	65400	65400	64800	66840	69960
1,974	74280	67560	61560	56160	50520	44040	36960	30600	27000	29640	36600	44400	50520	56280	63240	72480	81120	82920	79440	74520	70200	66600	64200	62280	60480	59640	58680	58080	59520	64080
2,481	68640	63000	57600	52200	46920	41400	36120	30720	28200	31680	38760	45960	51480	57000	63240	71880	80160	81360	76080	70440	66480	63480	61320	58920	56400	54000	52800	53040	55200	60720
2,992	63480	58560	54000	49080	45240	41400	36960	32280	30720	34560	40440	47160	52680	57960	63480	69840	76560	77040	72000	66600	63360	61680	59760	56640	53400	51000	50160	51000	53760	59040
3,472	59280	55080	51360	48000	45120	42240	38640	34800	33840	37440	42840	48000	54360	59160	63240	66720	70440	70680	67320	63240	60840	60120	57840	54240	51720	50160	49560	50640	53520	57600
3,999	55320	51480	49680	47400	45240	42960	40320	37680	36720	40200	45360	52440	57840	61680	62760	63480	65280	65400	63120	60240	58920	58200	56160	53400	51600	50280	49680	50520	52800	55920
4,506	51840	48240	47280	45960	44880	43560	41760	40560	40680	44640	51600	60360	64680	66360	64200	62400	61680	60960	58920	56880	56520	56040	54360	52200	51000	50280	49800	50760	52560	54600
4,971	48840	44640	44040	43920	43560	42720	42120	41760	43320	48000	55800	64080	68280	68280	64560	60720	57240	53880	52320	52440	53280	52800	52080	50760	50040	49920	50280	51600	53640	55440
5,493	48120	44160	42720	42840	42120	41280	40920	40800	42240	45240	52440	60720	63480	64080	61800	56280	51480	46920	45600	47160	48840	49680	49920	49680	49200	49080	50040	52320	55080	58080
5,969	49320	44880	42600	42480	41760	40680	40440	40200	40200	41160	36960	51720	54000	56280	56160	51960	47520	43920	42480	42840	44640	46920	48120	48360	48360	48120	49440	52800	56280	60480
6,497	50160	45600	42120	41280	40800	40200	39960	39960	39600	40320	42240	44760	46560	49320	49800	47040	43920	42120	41280	41160	42240	44880	46680	47040	47160	47280	48840	52680	57000	61560
7	51840	47040	41520	39360	38760	38400	38400	38280	38520	41280	42600	42360	43680	45840	45600	43200	41040	40320	40200	40560	41280	43200	44520	44760	45240	46200	48600	52920	57360	61560
7,497	54840	48240	41400	37920	36480	36240	36480	35760	36600	40800	43200	41640	42960	45840	45240	42360	40440	39600	39600	40560	41400	42360	42600	42480	43200	44640	47520	52080	56880	61440
7,956	53280	47400	41160	38040	36720	36480	36360	34800	35160	39240	41400	41040	44040	47760	47040	44280	41880	40200	39720	40680	41640	42000	41400	40800	41160	42720	45960	50280	55200	59760
8,475	49200	45600	41880	40320	39720	39120	38400	36240	35520	37560	38040	38520	43800	49080	49800	48600	45720	42000	39960	39600	40200	40080	39120	38640	39120	41040	44400	48840	53040	58080
8,997	47640	45960	43440	43800	43800	42120	41040	38400	36360	37320	36720	36840	43200	49800	53280	54360	49560	43680	39960	38160	38160	37200	36480	36720	38160	40320	44040	48840	52680	58080
9,479	49560	48000	46320	47880	48120	45360	42360	39120	37320	38640	39720	40440	45120	51600	56040	57840	52800	45240	40440	37920	36720	35040	34200	35280	38040	40680	44640	49320	53640	59160
9,956	52920	50880	49680	50520	50040	46320	42480	39120	37680	39600	42480	44160	47640	53400	57120	56640	52800	47040	42240	39600	37080	34680	33480	35160	39120	41880	45480	49920	54120	58800
10,49	55080	52440	51240	50040	47760	44400	41160	38040	37320	39840	42720	44040	46920	52320	56400	55680	51600	47040	43680	41400	38760	36840	36240	36840	39720	43200	45720	48960	52920	57360
10,964	53640	50400	47760	44640	41640	39000	36720	34800	35880	38160	39960	40680	42600	46800	50520	51000	48120	44640	42600	41520	40920	40560	39000	37200	38640	41880	43800	46320	50640	55920
11,508	50880	46560	41640	38160	34920	32640	31080	32160	34320	35040	35520	36480	36720	38400	41040	43320	43560	42360	41760	42000	44520	45000	41760	37800	37680	40080	42480	45480	50520	56520

Tabla D.5. Datos mapa magnético Plataforma P2 componente X (nT).

Y/X	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5
0	-19802	-20712	-22672	-23515	-23364	-21542	-18767	-15891	-14507	-13092	-11762	-9725	-8509	-7308	-6702	-7790	-9402	-10901	-11170	-12115	-13803	-14358	-11765	-7181	-2971	-602	1666	3576	5851	6495
0,491	-19093	-19883	-21749	-22734	-22751	-20765	-18098	-15281	-14460	-13512	-12576	-10156	-8413	-6768	-6371	-7623	-9402	-10586	-10475	-10965	-12515	-13081	-10627	-5787	-1265	1477	3160	4441	6012	6598
0,988	-16373	-16841	-18589	-19971	-20545	-19108	-17377	-15406	-15036	-14395	-13638	-11197	-9176	-7384	-6573	-7223	-8411	-9999	-10330	-11097	-11892	-11962	-9357	-5106	-982	1665	2799	3405	4096	4608
1,491	-14135	-14204	-15122	-16332	-16966	-15983	-14879	-13365	-13249	-12839	-12319	-10654	-9176	-8067	-7020	-6978	-7420	-9352	-10318	-11363	-11023	-10250	-7687	-4668	-1536	826	2765	4056	5215	5657
1,974	-12258	-11996	-12150	-13257	-14114	-14257	-14041	-13148	-12695	-12069	-11478	-10249	-9096	-8251	-7245	-6831	-6898	-8887	-10219	-11344	-10071	-8631	-6329	-5158	-3653	-2076	541	2521	4206	4699
2,481	-10669	-10320	-9847	-10764	-11708	-13086	-13727	-13374	-12455	-11557	-10875	-9837	-8822	-7943	-7289	-6994	-7139	-8392	-9210	-9806	-8478	-7168	-5650	-5302	-4463	-2901	-244	1940	3775	4387
2,992	-9964	-9619	-9080	-10102	-11335	-13095	-14009	-13719	-12208	-10706	-9524	-8794	-8002	-7232	-6671	-6535	-6692	-6812	-6557	-6329	-5986	-5840	-5786	-5752	-5097	-3436	-1784	-346	929	1713
3,472	-8902	-8587	-7922	-8826	-9950	-11927	-13194	-13301	-11866	-10256	-8873	-8782	-8558	-8381	-7265	-6788	-6547	-6461	-5910	-5530	-5306	-5450	-5686	-5739	-5103	-3634	-3027	-2379	-1494	-522
3,999	-8636	-8443	-7968	-9069	-10028	-11461	-12398	-12542	-11737	-10480	-9253	-8864	-8372	-7965	-6555	-5987	-5836	-6315	-6093	-5796	-5558	-5886	-6223	-5753	-4632	-3193	-3362	-3327	-2511	-1391
4,506	-6657	-6758	-6933	-8586	-9474	-10418	-11018	-11368	-11297	-10528	-9531	-8740	-7916	-7171	-5679	-5220	-5558	-7175	-7866	-7890	-6877	-6507	-6134	-4865	-3031	-1481	-2439	-3266	-2828	-1712
4,971	-4806	-5117	-6271	-8707	-10005	-10645	-11039	-11606	-11561	-10715	-9398	-8240	-7063	-5909	-5132	-5467	-6838	-8450	-9190	-8889	-7963	-7526	-7007	-5192	-2768	-1143	-2088	-3308	-3082	-2245
5,493	-4087	-4339	-5999	-8718	-10431	-10861	-11148	-11762	-11633	-10704	-9125	-8111	-6999	-5893	-5334	-5884	-7419	-8378	-8745	-8130	-7350	-6767	-5956	-4310	-1923	-610	-1547	-3324	-3725	-3353
5,969	-5588	-5545	-6427	-8263	-9555	-10247	-10825	-11669	-11646	-10970	-9518	-8320	-6976	-5799	-5723	-6503	-7908	-8135	-8201	-7674	-7318	-6888	-6067	-4892	-2770	-1718	-2689	-5126	-6425	-6581
6,497	-5834	-5588	-6006	-7302	-8427	-9245	-9892	-10673	-10704	-10311	-9119	-8271	-7313	-6785	-6253	-6148	-6185	-6146	-6291	-6262	-6523	-6597	-6193	-4816	-2390	-998	-2285	-5368	-7315	-7738
7	-6355	-5965	-5645	-6183	-6841	-8224	-9338	-10407	-10386	-10128	-9129	-7588	-6057	-5186	-5920	-6740	-7354	-6863	-6617	-6357	-6885	-7254	-7196	-5527	-2937	-1362	-2807	-5964	-7821	-8209
7,497	-5802	-5214	-4555	-4823	-5476	-6960	-8105	-9098	-9317	-9361	-8737	-7532	-6422	-6007	-6527	-7088	-7474	-7235	-7019	-6648	-7107	-7482	-7424	-5446	-2935	-1580	-2921	-5415	-6392	-6473
7,956	-6016	-5182	-4287	-4403	-5085	-6529	-7764	-8877	-9159	-9191	-8621	-7154	-5784	-4868	-5535	-6460	-7665	-7905	-7839	-7204	-7614	-7974	-7981	-5978	-3904	-2979	-4032	-5469	-5366	-5035
8,475	-6648	-5620	-4132	-3636	-3752	-4899	-6070	-7315	-7549	-7417	-6644	-6439	-6261	-6275	-6118	-6435	-7545	-8367	-8747	-8142	-7581	-6899	-6075	-5138	-4452	-4714	-5270	-5527	-4321	-3549
8,997	-7294	-6254	-4534	-3581	-3154	-4133	-5393	-6945	-7371	-7371	-6658	-6262	-5898	-5565	-5787	-6417	-8093	-8800	-9180	-8389	-7607	-6628	-5835	-5453	-5422	-5825	-6057	-5557	-3848	-2721
9,479	-8840	-7866	-5912	-4533	-3497	-3598	-4146	-5201	-6015	-6360	-5953	-5827	-5805	-5797	-6072	-6531	-7963	-8662	-9204	-8620	-7237	-5724	-4699	-5433	-6429	-7124	-6548	-5162	-3187	-2038
9,956	-8506	-7483	-5520	-4260	-3263	-3376	-3902	-4995	-5913	-6340	-6066	-5852	-5851	-5931	-5775	-5618	-6173	-6903	-7553	-7314	-6727	-6184	-6213	-7125	-8121	-8121	-7011	-5202	-3631	-2685
10,49	-8567	-7291	-5255	-4382	-3887	-4111	-4527	-5433	-5983	-6042	-5482	-5159	-5157	-5393	-5156	-4770	-4725	-5181	-5685	-5745	-5657	-5655	-6054	-7852	-9659	-10129	-7976	-5105	-2952	-2108
10,964	-8158	-6571	-4141	-3366	-3228	-4099	-4886	-5975	-6332	-6171	-5399	-4666	-4363	-4581	-4642	-4443	-4228	-4489	-4973	-5561	-6113	-6534	-6944	-8594	-10473	-11158	-9360	-6600	-4310	-3267
11,508	-8332	-6579	-4194	-3686	-3980	-4892	-5566	-6439	-6705	-6456	-5590	-4523	-3946	-4045	-4488	-4562	-4420	-4378	-4734	-5539	-6356	-6848	-7056	-8847	-11046	-12246	-10408	-7400	-4544	-3309

Tabla D.6. Datos mapa magnético Plataforma P2 componente Y (nT).

Y/X	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5
0	30951	29918	27418	24830	22586	21021	19874	19188	19207	19872	21134	22613	23998	25022	25663	26047	26409	26873	27178	27253	27272	27329	27455	27493	27039	26112	25237	24513	23843	22798
0,491	32776	31608	28918	26035	23436	21563	20176	19455	19372	19975	21128	22300	23285	23939	24728	25370	25804	26081	26217	26234	26023	25448	24847	24312	23905	23358	22676	21989	21292	20377
0,988	35989	34643	31164	27404	23901	22161	20992	20562	20199	20443	21192	21928	22532	22962	23743	24358	24413	24003	23570	23219	22481	20880	19192	17890	17609	17710	17685	17414	16950	16263
1,491	37485	36217	32519	28656	25186	23778	22864	22325	21718	21379	21399	21310	21349	21438	21887	22046	21483	20594	19730	19058	17981	16070	14137	12191	11710	11948	13413	14503	15236	14801
1,974	34008	32994	30098	27203	24734	24188	24023	23863	22251	20625	19203	18912	18944	19178	19212	18880	17910	16819	15624	14500	13044	11211	9591	8002	7798	8383	10416	12126	13382	13175
2,481	30607	29819	27839	25972	24404	23735	23376	23033	20893	18644	16412	16455	16729	17121	16370	15488	14315	13438	12191	10776	8859	7060	5675	4972	5248	6173	8407	10557	12331	12319
2,992	24032	23555	22692	21880	21113	20849	20785	20954	18854	16683	14339	14480	14613	14652	13340	12205	11205	10788	9930	8769	7139	5833	4953	4731	4928	5506	6665	8129	9463	9582
3,472	19946	19554	18614	17947	17366	16993	16506	16206	15532	14933	14140	14506	14693	14681	13130	11765	10679	10077	9481	8750	8272	7901	7636	6879	5981	5224	5994	7468	9123	9275
3,999	13634	13438	13275	13595	14047	14344	14157	13918	13255	12845	12373	12807	13035	13077	12085	11090	10250	9634	9545	9610	10693	11523	12100	10623	8650	6574	6769	7902	9612	9771
4,506	12381	12418	12510	12904	13295	13506	13209	12743	12309	12245	12332	13176	13904	14455	13590	12605	11614	10760	10557	10746	12490	13884	14810	13621	11803	9711	9446	10093	11593	11723
4,971	13561	14030	14579	14705	14350	14475	14411	14325	13180	12445	12046	12644	13208	13623	13186	12743	12164	11461	10978	10901	12633	14299	15626	15101	14007	12484	11770	11712	12559	12570
5,493	17619	18200	18760	18396	17232	16080	15071	14251	13666	13470	13675	14263	14867	15414	15078	14901	14511	13855	12919	12244	12910	13787	14568	14831	14766	14266	13338	12794	13024	12931
5,969	19968	20377	20266	19299	17625	16963	16545	16274	14868	13698	12904	13025	13246	13645	13935	14473	14701	14149	13081	12059	12660	13541	14514	14406	14207	13730	13034	12573	12603	12447
6,497	21523	21604	20758	19460	17761	17091	16640	16207	14854	13523	12442	12628	13003	13715	13825	14237	14447	14587	14255	13731	13628	13640	13762	13834	13957	14051	13737	13682	13840	13697
7	18442	18474	17852	16924	15756	15517	15436	15320	14154	12862	11658	10884	10397	10266	10821	11569	12334	13009	13504	13716	13795	13786	13728	13172	12818	12849	13629	14454	14965	14657
7,497	15832	16008	16171	16001	15546	15144	14760	14409	13720	12959	12193	10890	9884	9047	9824	10525	11423	11929	12699	13364	13718	13820	13671	13549	13805	14715	16003	16938	17058	16456
7,956	12944	13353	14568	15405	15775	15366	14815	14371	13862	13386	12885	11571	10535	9509	9900	10000	10252	9985	10259	10759	12004	12924	13545	13184	13475	14519	16192	16973	16532	15590
8,475	14513	14995	15420	15616	15285	15214	14885	14606	14273	14011	13754	12939	12336	11715	11385	10836	10264	10048	10266	10905	12009	12839	13464	13629	14613	16255	17272	17150	15798	14757
8,997	14407	14823	15181	15510	15386	15204	14751	14232	14130	14048	13979	13688	13548	13478	12852	12200	11359	10871	10467	10373	10615	10819	11117	11727	13188	15146	15923	15467	14032	13041
9,479	14669	14871	14927	15118	15148	15183	15004	14642	14468	14198	13880	13393	13042	12846	12655	12578	12298	12082	11613	11158	10403	9990	10033	11242	13123	15249	15600	14757	13295	12412
9,956	13300	13358	13385	13523	13797	14265	14684	14880	14685	14245	13641	13167	12776	12526	12572	12809	12951	12309	11233	9993	9539	9724	10521	11377	12531	13747	14367	14175	13614	12952
10,49	13185	13220	13148	13103	13320	13608	14027	14276	14432	14244	13780	13269	12716	12208	11911	11891	11899	11491	10644	9746	9942	10772	11971	12415	12853	13379	13807	14106	14225	14013
10,964	12832	12980	12865	12806	12907	13413	14090	14672	15213	15406	15268	14779	14138	13474	12998	12766	12580	11997	11127	10371	10971	12076	13213	13110	12736	12599	13145	14288	15492	15806
11,508	12912	13143	13369	13683	14038	14198	14520	14796	15567	16040	16188	15739	15052	14293	13541	13003	12498	11870	11074	10504	11287	12466	13496	13538	13232	13241	13289	14275	15482	16087

Tabla D.7. Datos mapa magnético Plataforma P2 componente Z (nT).

Y/X	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5
0	45673	46759	50469	55114	59551	63823	67350	68548	68274	70257	68139	64863	63576	62371	59255	55818	56370	59081	59718	59820	61675	66827	73371	75316	73844	71616	69436	67494	67832	67158
0,491	46677	46561	48217	52178	55607	58683	60500	62088	62171	63714	63043	61409	61311	61388	59236	56498	57133	60991	62056	61446	62839	69641	77184	79908	77289	73956	70889	69340	68684	67774
0,988	53987	52123	50960	52788	55055	55730	57724	59436	60298	61304	62589	62696	63982	63688	62149	59924	61276	64968	67329	67329	68088	72399	77666	79583	77743	74223	70701	69176	68011	67123
1,491	62087	59581	56269	58367	59212	58212	57593	59517	60486	61979	63968	64572	64888	64352	63086	62912	64074	66097	68228	68877	69652	72762	75449	76514	75702	73707	71080	68907	67475	67184
1,974	66321	62989	58422	60330	60907	60284	61586	63537	63694	63517	64581	64943	64600	64620	64143	64909	64981	65223	65927	67126	67740	70192	71369	71773	71982	71555	69988	66979	65453	64776
2,481	73389	68338	63021	60511	60531	60861	60832	63227	62810	64855	65127	65015	65214	65560	65547	64783	63947	63742	65107	65613	65256	65649	65278	65427	66177	67139	66714	65571	64504	64063
2,992	73524	67379	62064	60031	59380	59788	60028	62346	62198	63422	63326	63221	62404	62783	62726	62488	61773	61677	60708	59294	58588	58630	57740	58410	59479	61719	62670	62016	61468	61371
3,472	74949	68580	63586	61221	59569	59270	59076	61172	62331	62282	61564	61218	60078	59666	58194	57119	57361	58263	56973	54254	52868	51454	50952	52475	54157	55951	57685	58536	58691	59169
3,999	72791	66536	60708	59027	58381	57956	58397	60124	61809	61029	60522	59749	57710	56544	54335	52853	52931	54214	55024	52635	51308	49711	49389	50583	52514	53070	54210	54870	56342	56796
4,506	68065	60049	52987	52209	54343	55232	54833	56208	57660	59549	59717	59170	58549	57265	55239	53106	51717	52169	53811	53864	53352	51621	51670	52178	53339	52511	51846	52447	55119	55641
4,971	63294	55028	48208	49023	52585	54028	53784	54408	55820	57340	57966	57278	56256	55693	53177	51419	49646	49823	52012	54171	54260	53145	53858	54069	53586	51630	49398	50060	53651	55176
5,493	61847	55709	50531	50268	52489	53051	51602	51968	52841	55525	56886	56789	56915	56423	53965	50127	48896	48810	51233	53316	54285	52616	54270	54998	54620	51812	48150	48485	52027	54662
5,969	62510	57741	53948	50780	51310	50956	51634	51392	51807	53530	55337	56008	55437	55048	53110	51319	50664	50270	50958	51781	53096	53466	54939	56270	55079	52144	47833	47243	50604	53931
6,497	64060	59256	55820	56103	55227	54202	51290	51024	50765	53602	55193	56018	55757	55092	53865	53441	53087	52489	51692	51729	52795	51468	52704	54400	55039	51887	46942	45151	49005	53993
7	65447	60522	57084	55859	54518	53400	52867	52752	51805	52675	54252	54903	53014	51895	51652	53383	53995	53626	52135	51655	52010	51794	52551	54499	53626	49598	44253	43525	48507	53334
7,497	67960	62660	59237	55419	53503	52259	51985	52029	51108	51181	52345	52683	53210	51979	52307	51661	52565	53038	53193	53011	52937	52949	53094	54275	53525	49168	45090	43807	49069	53290
7,956	66371	62122	58366	55233	53322	51888	50424	50351	49676	50303	51152	51075	51142	50392	50180	49046	48909	50028	51629	52289	52653	51772	52388	52753	50334	46960	44229	45557	50057	53162
8,475	65241	62029	58470	54502	52429	50583	49441	48701	48238	48869	49646	49767	49176	49159	48500	47185	45560	46511	49176	50692	52312	51027	51466	52014	51218	49238	48615	51129	53901	55121
8,997	62405	59908	57193	56265	54190	51849	50234	49090	48537	48871	49670	49498	48838	49010	48239	46138	44100	44165	45565	48085	50261	51496	51015	50746	49416	49133	50042	53666	55482	55131
9,479	62626	60052	57993	56680	54828	52220	50563	49052	48076	48226	48895	48423	47573	47771	47207	45587	44228	43297	45674	48026	49657	49473	48509	47634	47273	49000	50825	53279	54326	53739
9,956	62934	59801	57502	55497	54004	51736	50245	48422	47280	48087	48239	47617	46734	46804	46633	45884	44680	43419	44458	46128	46221	45136	44814	44504	45429	49011	51255	52131	50913	50397
10,49	63770	60567	56865	55392	53989	52446	49872	48048	47098	47695	47549	46474	45351	45258	45177	44664	43624	42861	43555	44246	43222	41323	41997	42173	44950	49870	52692	50970	48578	47773
10,964	61467	59232	54814	51452	50030	49246	48719	47407	47003	46613	46345	45031	43676	42890	42369	43051	42779	42083	41513	41054	40777	40430	41161	41116	41524	46167	49451	51085	49603	48459
11,508	59795	58150	53703	49805	48715	48320	47187	46543	46693	46655	46599	45167	43193	41809	40805	40894	40806	40021	39312	38367	38275	39572	40547	39790	40046	43626	46834	48784	49571	49240

Tabla D.8. Datos mapa magnético plataforma *P3* componente *X* (nT).

Y/X	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5
0	-448	922	1748	514	-1926	-3584	-3662	-1460	1492	3828	4028	2162	55	-1175	-224	1568	2653	3214	3033	1834	-892	-3146	-4160	-4583	-4807	-4716	-4119	-2504	862	3201
0,491	42	1474	2373	941	-1541	-3675	-4230	-2539	542	3158	3673	2038	195	-660	846	2774	3233	2465	1403	349	-1420	-3046	-3945	-4096	-3626	-2910	-2804	-2170	14	1955
0,988	1345	2883	3539	1428	-1602	-3816	-4264	-2524	866	3887	4897	3209	1385	768	3054	5094	4514	1874	-287	-931	-1230	-1909	-2549	-3348	-3001	-2584	-1928	-1355	501	1897
1,491	3640	5054	5037	2145	-1532	-3834	-4147	-2367	1460	4836	6249	4232	2113	1303	3346	4986	3899	1450	-380	-252	-719	-1709	-2996	-3479	-2803	-2202	-1342	-576	1248	2402
1,974	5262	6325	5416	1892	-2214	-3572	-2825	-212	2633	4922	5354	3626	1783	1346	2966	4300	3465	1912	748	1023	326	-770	-2168	-3292	-3574	-3925	-2112	55	3091	4306
2,481	4708	5406	4649	1666	-1613	-2776	-1974	302	2147	3431	3066	2062	995	1422	2358	3176	2552	1696	860	557	157	-431	-1225	-1793	-1728	-1455	-190	1600	3843	4941
2,992	4995	5464	4458	1506	-1504	-2196	-1212	697	952	777	-524	-384	-260	1201	1825	2460	2309	1745	949	-70	220	477	602	-237	-464	-140	1368	3114	4809	5529
3,472	5055	5556	4532	1698	-1167	-1204	29	1636	1223	563	-551	-738	-854	16	813	1672	2202	1704	994	-228	399	955	1334	747	890	1834	3377	4563	5242	5430
3,999	4997	5665	4743	2270	-381	-393	389	1084	252	-649	-1419	-2068	-2571	-2383	-1003	396	1602	1345	989	306	962	1601	1962	1107	972	1636	3708	4956	5366	5093
4,506	2823	3759	3474	2101	318	190	295	-41	-635	-1198	-1226	-2002	-2552	-2556	-894	624	1828	1343	836	359	755	1541	2082	2828	3956	5642	7355	8026	7741	7198
4,971	-67	1070	1889	2268	2031	1236	178	-1673	-1959	-2198	-1519	-1883	-1908	-1648	-786	-320	-273	-430	-585	-419	-284	950	2192	3609	4863	6409	8993	10342	10594	9789
5,493	-3270	-2044	-67	2080	3561	3474	2703	776	-358	-1368	-1079	-658	148	611	363	-421	-1274	-1523	-1799	-1718	-1895	-283	1576	4079	5822	7770	10433	11765	11818	10842
5,969	-5720	-4396	-1081	2719	5832	6099	5620	3828	1599	-645	-1434	-554	764	850	-383	-1979	-2817	-3086	-3598	-3886	-3351	-654	2254	3828	4253	5159	8076	9768	9942	8999
6,497	-7419	-5951	-2300	1903	5329	6010	6318	5492	3026	143	-1508	-19	1685	1406	-971	-3150	-3649	-3711	-4204	-4642	-3454	-215	2976	4574	4849	6038	8009	9116	8579	7894
7	-6308	-4635	-2015	1009	3064	4000	5213	5661	4357	2055	515	1686	2673	1448	-1788	-4162	-4340	-3730	-3567	-3425	-2578	-150	1971	2902	2492	3308	5919	8224	8897	8610
7,497	-6763	-4928	-3000	-932	24	1778	4292	6372	6255	4782	3531	3644	3304	1087	-2453	-4888	-5155	-3967	-2896	-1795	-760	1189	2621	2933	2177	2823	5582	8400	9589	9614
7,956	-6345	-4442	-2695	-1115	-629	1100	3784	6249	7144	6466	5398	3909	2205	-564	-3060	-4558	-4201	-2358	-400	1429	1643	2198	2205	1923	999	1513	4731	8150	9961	10168
8,475	-7037	-5206	-3081	-1335	-498	1098	3633	6057	6626	5484	3407	1208	-641	-2794	-4140	-4710	-3642	-1187	1348	3431	3486	3499	2979	2935	2857	4199	6398	8613	9346	9611
8,997	-6043	-4394	-2451	-985	-176	1237	3573	5776	6075	4484	1702	-702	-2199	-3513	-4089	-3925	-2356	307	2719	4435	3835	3087	1917	2007	2524	4245	6467	8400	9150	9355
9,479	-4389	-2956	-1508	-548	-28	1603	4171	6494	6047	3574	-104	-2756	-4140	-5096	-4878	-3877	-1804	689	2573	3751	2916	2033	945	1714	3137	5451	6542	7070	6653	6719
9,956	-3901	-2634	-1374	-542	-22	1304	3570	5541	5544	3409	102	-2774	-4080	-4797	-4344	-3198	-1404	767	2094	2904	2248	1753	1258	1653	2673	4269	5604	6205	5967	5827
10,49	-4332	-3192	-1940	-995	-313	1021	3226	5106	4653	2128	-1512	-3801	-4360	-4247	-3237	-1782	5	1612	2385	2891	2149	1719	1364	2400	3872	5757	6480	6442	5518	5179
10,964	-5418	-4427	-3170	-1974	-1002	140	1988	3454	3198	1175	-1696	-3232	-3163	-2515	-1484	-333	861	1382	1245	1168	1200	1634	2019	2762	3708	5058	6346	6992	6727	6287
11,508	-5380	-4498	-3585	-2592	-1774	-348	1661	3226	2648	548	-2202	-3337	-2996	-2174	-833	455	1643	1473	771	352	606	1280	1770	2823	3950	5517	6662	7245	6905	6425

Tabla D.9. Datos mapa magnético plataforma *P3* componente *Y* (nT).

Y/X	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5
0	25182	24549	23943	23647	24012	24762	25623	26472	27232	27739	27666	27167	26103	24401	21857	18445	15823	14903	16523	18876	20777	21372	21776	22700	23473	23114	21433	20283	20139	20817
0,491	25725	25176	25057	25107	25745	26239	26690	26938	27370	27780	27866	27343	26277	24701	22699	20191	18403	17992	19488	21561	23153	23624	23720	23984	24052	23252	21608	20461	20072	20499
0,988	26004	25695	26595	27479	28666	29105	29315	29114	28458	28003	27601	27060	26221	25146	24912	24531	24678	24718	25639	26733	27184	26818	25962	25340	24613	23500	21613	19972	18556	18457
1,491	28558	28186	28408	28724	29171	28881	28276	27258	26530	26166	26125	26131	26128	26203	27009	28151	29517	30284	30380	30095	29534	28836	27781	26115	24664	23460	22501	21393	19746	19273
1,974	27968	27548	27624	27888	28152	27299	26148	24784	24276	24258	24728	25474	26352	27345	28992	30984	32888	33515	32756	31355	30017	28881	27586	25608	24082	22950	22476	21647	20120	19533
2,481	28249	27694	27028	26553	26084	24825	23297	21814	21899	22727	24135	25382	26554	27634	29284	31273	33089	33305	32092	30229	29092	28160	27154	25159	23516	21938	21558	21028	20374	20037
2,992	25089	24702	24585	24214	23688	22097	20376	18945	19123	20285	22028	23356	24232	24774	26471	28567	30617	30623	29649	28123	27450	26702	25816	23797	21894	19709	18989	18383	18236	18127
3,472	22462	22469	23001	22748	21950	20107	18298	17003	17471	18886	20783	21490	21607	21260	22520	24199	26052	26193	26054	25591	25428	24817	23866	22531	21042	19103	17544	16216	15541	15497
3,999	20657	21135	22154	22075	21005	19285	17604	16520	16412	17021	18020	18288	18153	17613	18960	20574	22460	22542	22966	23461	24038	23979	23208	22622	21640	20287	18202	16295	14807	14634
4,506	17928	18770	20381	20888	20195	19262	18152	17505	17481	17967	18782	18324	17545	16407	16384	16676	17379	18330	19872	21800	22525	22730	21860	22197	21922	21380	19621	17975	16591	16371
4,971	17360	18279	20102	21092	20999	20473	19501	18738	18290	18235	18420	18087	17253	16019	15111	14904	15397	16197	17410	18935	20506	21789	21941	22293	22096	21796	20826	19833	19018	18866
5,493	16505	17374	19234	20543	21084	21267	20809	20165	19919	19885	20011	19352	18028	16418	14195	13176	12971	14399	15821	17276	18691	19930	20302	20547	20722	21045	20831	20344	19794	19773
5,969	17007	17655	19499	21031	22169	22924	23070	22627	21583	20307	19076	17488	15668	14115	13400	13858	14820	15797	16413	16731	17623	18417	18812	18213	18050	18280	19174	19638	19635	19732
6,497	19118	19442	20282	21052	21787	23226	24229	24400	23223	21350	19420	17213	15340	14374	14835	16015	17212	18199	18690	18563	18221	17955	17812	16760	16360	16425	17855	18837	19019	19148
7	21107	21036	20992	21075	21359	22378	23226	23430	23193	22082	20822	18883	17658	17514	18941	20347	21428	21160	20511	19087	18248	17732	17767	16700	16041	15602	17532	19170	20049	20102
7,497	22741	22328	21086	20149	19509	20429	21379	22095	22434	22077	21674	21593	22204	23451	24424	24828	24760	23803	22595	20679	19082	18035	17755	18107	18582	18948	19901	20672	20977	20964
7,956	22258	21634	20100	19004	18227	19172	20214	21325	21800	21864	22118	23086	24682	26409	27501	27751	27351	25446	23226	20545	18903	17922	17768	18713	19541	19955	20126	20427	20690	20858
8,475	20390	19697	18515	17848	17524	17987	18544	19246	19908	20448	21368	22912	24809	26527	27104	26786	25652	24547	23275	21934	20394	19435	19119	19853	20340	20272	19827	19860	20241	20754
8,997	18151	17549	17175	17282	17724	17661	17660	17749	18539	19392	20640	22428	24278	25850	25671	24568	22568	21223	20112	19368	18836	18729	18929	18793	18242	17107	16662	16959	17877	18662
9,479	15494	15123	15308	15825	16593	16692	16813	16958	17925	19011	20444	21741	22899	23697	22913	21265	18847	17900	17537	17798	17884	18202	18487	17983	17073	15709	15237	15440	16278	17071
9,956	13157	13060	13663	14411	15260	15910	16573	17273	17866	18474	19265	19795	20098	19954	19445	18432	17066	15997	15502	15538	15965	16399	16549	15698	14687	13565	13670	14185	15135	15838
10,49	11706	11756	12512	13322	14125	14889	15736	16741	17686	18489	19157	18791	18060	16866	16451	16044	15773	15078	14804	14811	15523	15979	16051	14969	14090	13437	13972	14632	15435	16046
10,964	11883	11958	12810	13762	14650	15151	15753	16673	17938	19029	19580	19003	17844	16335	15440	14742	14458	14080	14309	14821	15650	16037	16029	15300	14868	14722	15718	16769	17764	18351
11,508	12106	12140	13046	14106	15110	15561	16134	17111	18647	19998	20587	20005	18733	17200	15728	14491	13726	13288	13620	14302	15447	16088	16358	15989	15889	16028	16813	17648	18340	18904

Tabla D.10. Datos mapa magnético plataforma *P3* componente Z (nT).

Y/X	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5
0	57297	53450	50107	46406	43621	45571	48581	51246	52465	50528	46640	45475	44413	44959	48045	50491	50400	48775	44413	39566	39667	43960	47324	49986	53306	57353	63500	70212	75051	78306
0,491	55814	52017	47910	44169	42773	45193	47034	50592	53053	50520	46656	45165	46546	47304	48257	43347	38126	37048	39221	38794	39812	42402	44702	49263	52624	55121	58715	64273	68584	74186
0,988	58705	54989	49740	46034	45863	48970	51284	54640	56997	53684	50516	48754	48638	48868	48833	44126	36034	34311	37015	41119	43845	45837	47398	52616	57309	56860	57632	60437	64210	70892
1,491	64354	60560	54793	49146	48172	52139	54419	56302	57174	56290	53046	50602	49810	49920	49849	44135	36821	35876	40148	43914	46423	50028	51501	55830	58834	58217	59144	62290	65430	71005
1,974	61503	56224	51854	51713	50615	54450	58498	60044	60050	55409	51161	48357	48895	49962	50783	48986	44058	43718	46430	48243	49738	48910	49890	53806	57272	57359	60411	64149	65736	70176
2,481	65471	58996	54707	51593	51062	54847	58654	59289	58960	56262	52237	50061	51040	53060	54592	54083	51391	51208	51791	51634	52585	52853	52336	55029	57959	58620	62695	66078	66203	68950
2,992	65932	58712	53821	51151	50916	54441	56578	56201	56096	55257	52491	51647	54007	56612	58268	57635	55738	55593	56403	53582	54160	54656	53574	55515	58360	59176	61497	62718	62427	65481
3,472	65946	58436	53085	51323	50474	53347	55179	54107	54074	53836	52783	52830	55049	57455	59135	58024	57576	58097	58793	55187	54786	53535	51921	53651	57219	57630	58489	58322	57954	62087
3,999	66537	60195	55120	51818	49760	51237	51592	49824	50003	50088	50435	51264	53981	55251	56438	56866	57202	57748	57743	56016	55331	55916	53809	55099	56209	56029	55930	56408	56016	60057
4,506	63297	58437	55059	53155	49862	49601	47589	45249	45487	48106	49014	50646	52439	54129	55061	52775	52324	52940	53688	54007	55372	57040	55127	55864	56022	55207	54630	53989	53043	56765
4,971	60496	57753	56495	55330	51556	49760	47045	44107	43673	42945	43502	45035	48006	50343	51504	52095	51844	52570	51669	52742	56154	59568	58377	58368	56616	54847	53397	50761	49252	52671
5,493	56285	55299	55855	53794	49941	47992	47183	43252	42754	44015	45633	47806	47952	47373	46589	46156	46274	48154	51069	53299	58356	60707	60048	59096	58547	56496	54828	50310	48455	52023
5,969	52216	52982	55123	55600	52080	50389	45858	41341	40816	43522	45761	48382	47470	44014	41314	42647	44339	46580	47790	50348	56281	60810	60016	57902	56834	56145	54686	52918	50434	53965
6,497	51706	53886	56587	56577	53445	52135	49698	44875	42468	42204	43260	45082	45365	40505	37676	39465	43245	44987	45547	47800	53854	57259	55187	52822	54532	56220	56793	53998	51484	54525
7	50438	53213	56180	56683	54068	54012	54318	49839	45309	42732	41817	41219	37968	32445	31437	36720	41046	43439	45934	47772	52106	54057	51482	49251	51010	53755	55539	54625	52532	54804
7,497	51227	54053	56269	56810	54494	55124	56386	52444	47081	43170	41332	39526	35767	31317	31747	36822	40343	43406	48662	49545	51995	52972	51077	49311	50115	53242	56793	54253	51084	52408
7,956	53846	55832	57319	57497	55498	56017	54785	51427	46882	44798	42681	41104	39677	36645	37071	41765	44137	46933	48668	48991	50580	52382	50502	49498	49159	51737	54876	54164	49967	50191
8,475	55726	56711	57221	55680	53816	54310	53641	50776	47179	43810	41152	41013	42376	41313	41984	45440	48202	50453	53875	52631	52050	51976	50320	50249	52312	54271	56475	55978	52124	51752
8,997	55883	56261	56432	54105	52620	53271	54343	51871	48142	43379	40727	41964	44030	43904	45296	51663	54556	55947	53803	51211	50118	50677	48804	49621	52729	53530	54338	54772	51583	51834
9,479	55860	55196	54759	52555	51543	52443	52363	49628	46159	43309	42091	44148	45528	45693	47515	53371	53914	53779	52306	50573	50705	51262	49972	51378	54948	54487	54490	53889	51789	53175
9,956	54586	53978	53334	51366	50561	51798	50580	47338	44037	40965	39662	42561	46995	47573	49934	53582	52010	50736	50421	48832	49332	50023	49590	51470	53915	52546	51639	51975	50493	52421
10,49	50061	50485	50717	48240	47853	49456	49031	46119	42852	39323	38176	42017	46968	47766	50006	51870	50127	48991	48319	46826	47582	48647	48115	49334	50858	49587	48625	47385	45659	47930
10,964	44754	45702	46512	44710	44268	45906	45165	42631	40012	37411	36210	39732	43638	43684	45136	46317	45158	44670	45010	44607	45519	45742	44353	44763	45564	44898	44864	44277	42450	45213
11,508	42707	42922	43864	43010	42517	43824	43654	40898	39404	38109	37328	39872	41376	40437	41291	41944	40591	40346	40901	41533	43553	44472	42391	42833	42785	42562	43915	43980	42311	45309

Tabla D.11. Datos mapa magnético plataforma *P4* componente *X* (nT).

Y/X	0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50	9,00	9,50	10,00	10,50	11,00	11,50	12,00	12,50	13,00	13,50	14,00	14,50
0,00	-952	-1865	-2639	-2559	-1171	-397	-477	-1865	-3142	-4701	-5113	-4928	-3431	-1718	-297	120	-38	-130	16	291	-73	-250	-165	1029	2242	3242	3878	5378	8317	10351
0,49	-438	-1380	-2344	-2438	-1333	-369	-276	-1380	-3059	-5058	-5959	-5390	-3306	-833	654	1008	663	468	444	561	-126	-590	-764	530	1855	2969	3600	5054	7867	9830
0,99	-1429	-2396	-2431	-1644	64	99	-688	-2396	-4106	-6224	-7395	-6764	-4297	-1064	1067	1985	1947	1515	1060	726	-231	-1032	-1478	-94	1480	2872	3626	5096	7763	9576
1,49	-957	-1770	-1822	-1326	-376	-323	-820	-1770	-3826	-6450	-8380	-7774	-5197	-1651	719	2086	2512	2627	2424	2143	810	-566	-1465	-377	1125	2491	3344	4852	7389	9082
1,97	-2636	-3168	-1866	-428	932	-370	-1808	-3168	-4432	-6466	-8097	-8003	-5881	-2780	-339	1442	2488	3261	3374	3062	1446	-424	-1689	-1130	13	1114	2401	4423	7387	9067
2,48	-2161	-2405	-1134	-105	467	-804	-1834	-2405	-3347	-5200	-6873	-7030	-5219	-2525	-608	918	1948	3497	4129	3955	2060	-114	-1604	-1577	-952	-175	1225	3520	6727	8496
2,99	-2226	-2258	-628	459	901	-729	-1816	-2258	-2998	-4715	-6379	-6467	-4772	-2239	-546	901	1955	3339	3694	3000	1409	-282	-1408	-2013	-2162	-1878	-601	1696	4898	6717
3,47	-996	-908	268	737	587	-589	-1059	-908	-1590	-3279	-4930	-4962	-3445	-1088	768	2438	3567	4698	4808	3908	2382	912	-169	-1174	-1875	-1929	-1121	778	3580	5376
4,00	747	874	1352	1221	601	123	254	874	-210	-2333	-4415	-4305	-2785	-442	1561	3453	4632	6105	6586	6246	4248	2301	606	-941	-2311	-2993	-3153	-2218	-375	1241
4,51	1001	1082	1583	1933	1971	1470	1120	1082	303	-1423	-3125	-2954	-1397	913	2470	3984	4741	6324	6960	6950	4641	2205	-17	-1442	-2745	-3431	-3678	-2713	-779	789
4,97	1452	1283	1820	2987	4136	3599	2432	1283	241	-1377	-2930	-2970	-1744	119	1670	3241	4259	5607	6116	5983	3946	1588	-547	-1697	-2699	-3101	-3506	-2572	-634	1031
5,49	1886	1298	1531	3211	5421	5189	3508	1298	448	-306	-793	-1375	-1109	-445	971	2510	3954	4718	4789	4012	2399	300	-1561	-2277	-2747	-2593	-2205	-274	2751	4722
5,97	4065	3139	2488	3625	5880	6532	5395	3139	1932	1337	1256	524	53	-393	605	1934	3843	5035	5607	4995	3224	921	-1138	-1828	-2178	-1868	-1582	341	3394	5572
6,50	7017	6119	3923	3247	4017	6214	6890	6119	4545	3532	3082	2502	1862	881	664	954	2613	4985	6766	6918	4705	1894	-703	-1663	-2212	-2135	-1860	118	3306	5581
7,00	7331	6943	4712	3314	3111	5342	6740	6943	5900	4850	3986	3723	3500	2759	1389	397	1376	4598	7523	8528	6625	3943	1351	-81	-1138	-1578	-1637	113	3059	5329
7,50	6454	6681	4712	3081	2124	4093	5723	6681	6520	5863	4869	4527	4434	3824	2608	1478	2649	5180	7962	8737	7556	5219	2730	989	-548	-1468	-1458	584	3676	5829
7,96	3615	4214	2917	1829	1035	2332	3420	4214	5362	6024	6039	6041	6121	5656	3680	1575	1764	4369	7819	9461	8998	6941	4445	2054	-258	-1765	-1881	212	3016	4966
8,48	2214	2805	1433	396	-373	998	2036	2805	4283	5691	6645	7014	6967	6110	4152	2214	2531	4673	7813	9437	9346	7394	4660	1958	-648	-2128	-2164	21	2573	4346
9,00	2929	3281	1254	-277	-1304	723	2253	3281	4415	5865	7407	8151	8038	6681	4012	1650	1428	4428	8137	10575	10415	8425	5469	2067	-1103	-2860	-2514	-90	2614	4301
9,48	3122	3037	1405	433	415	2047	3020	3037	3522	4621	6558	7467	7326	5609	3790	2562	3277	5904	8660	10293	9885	7947	5062	1694	-1319	-2884	-2181	355	3309	4975
9,96	3936	3380	1320	5	101	2161	3476	3380	2849	3112	4923	6359	6798	5451	4191	3612	4679	6913	8675	9440	8792	7109	4622	1128	-1961	-3661	-2383	422	3777	5371
10,49	2575	1708	176	-649	131	1662	2488	1708	703	527	2324	4334	5623	5105	4816	5092	6653	8141	8693	8412	7489	6019	3752	560	-2016	-2955	-1681	617	3290	4756
10,96	2617	1704	-198	-1470	-1272	630	1902	1704	270	-401	925	3117	4998	5249	5660	6323	7860	8440	7854	6634	5841	4960	3055	-408	-3035	-3418	-1378	1240	3724	5082
11,51	2065	1222	-152	-956	-491	884	1688	1222	-65	-709	546	2620	4658	5179	5994	6867	8402	8776	7915	6517	5573	4739	2707	-768	-3241	-3058	-773	1827	3984	5282

Tabla D.12. Datos mapa magnético plataforma *P4* componente *Y* (nT).

Y/X	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5
0	23245	23137	22613	21981	21217	20431	20088	20237	21373	22657	24250	25075	25796	25865	25690	24897	23836	22780	22155	21897	22076	22373	22735	22870	23076	23305	23895	24449	24946	25029
0,491	22727	22628	22111	21382	20633	20270	20409	20935	21731	22556	23577	24204	24857	25091	25346	25013	24315	23099	22144	21463	21353	21443	21708	21950	22250	22516	22652	22776	22931	23033
0,988	21904	21769	21246	20366	19677	19657	20234	21013	21826	22480	23207	23379	23709	23949	24637	24878	24600	23196	21758	20427	20207	20323	20876	20865	20915	20822	20648	20471	20382	20492
1,491	22547	22425	21960	21101	20504	20694	21441	22235	22632	22752	22884	22501	22256	22135	22674	23046	22888	21892	20574	19205	18349	17944	18128	18371	18759	19079	19246	19370	19433	19524
1,974	24069	24015	23421	22468	21725	22012	22720	23419	23503	23209	22836	22097	21484	21089	21096	21133	20770	20062	18936	17718	16857	16383	16382	16457	16911	17540	17830	17975	17879	17979
2,481	23755	23871	23679	23292	23023	23144	23389	23512	23516	23103	22470	20742	19117	17747	17569	17529	17324	17007	16405	15757	15093	14589	14251	13984	14304	15039	15574	15987	16168	16392
2,992	23144	23474	23600	23710	23831	24070	24078	23799	23443	22727	21731	20011	18411	17068	16578	16157	15701	15312	14964	14698	14475	14180	13816	13259	13290	13830	13826	13865	13855	14272
3,472	22997	23440	23699	24020	24166	23811	22997	21861	21319	20568	19635	18366	17136	16094	15246	14456	13681	13217	13077	13085	13184	13088	12929	12518	12461	12799	12653	12761	12991	13503
3,999	25042	25397	25500	25604	25235	24121	22619	21083	20440	19726	18934	18275	17593	17008	15487	14141	12879	11970	11377	10857	11476	11945	12472	12329	12270	12445	11963	11713	11552	11852
4,506	27265	27342	27102	26757	25745	23840	21707	19991	19192	18371	17362	16932	16564	16367	14796	13563	12510	11819	11214	10510	11129	11724	12507	12661	12762	12921	12601	12313	11933	11852
4,971	29205	29064	28627	28064	26859	24738	22374	20601	19951	19345	18368	16629	14984	13687	12669	12277	12223	12358	12257	11847	12417	13067	13929	13970	13905	13802	13626	13285	12646	12200
5,493	29052	28861	28332	27897	27135	25957	24255	22770	21784	20836	19401	17142	15021	13506	12995	13303	13983	14827	15236	15251	15313	15430	15723	15558	15288	14884	14602	14149	13408	12817
5,969	27912	27770	27153	26972	26963	27245	26792	25786	24744	23622	22222	19437	16761	14696	14565	15387	16594	17742	18308	18418	18180	17914	17717	17056	16333	15521	14862	14184	13397	12904
6,497	25409	25343	24805	24939	25583	27039	27923	27770	26975	25757	24510	22577	20818	19361	18913	19324	20264	21249	21590	21290	20477	19467	18476	17147	15933	14826	14261	13842	13525	13239
7	24395	24492	24049	24140	24692	26279	27728	28346	27929	26741	25443	24299	23366	22457	21817	21820	22520	23579	24115	23800	22446	20742	19025	17588	16482	15794	15316	14969	14767	14620
7,497	22803	23158	23581	24228	25029	25816	26783	27512	28363	28338	27765	26954	26258	25567	24330	23413	23121	23993	24756	24781	23512	21791	20066	18762	17865	17455	17277	17096	17032	16883
7,956	22325	22918	23815	24681	25428	25888	26578	27435	28694	29343	29131	28342	27411	26653	25631	24634	23829	24095	24694	25019	24171	22900	21648	21147	21030	21223	20984	20544	20142	19913
8,475	21626	22326	23340	24205	24838	25261	25787	26494	27809	29038	29636	29352	28620	27992	27171	26092	24680	23717	23416	23507	23580	23388	23183	23357	23706	24031	23648	23117	22681	22527
8,997	20876	21489	22067	22514	22764	23510	24202	24967	25478	26431	27256	27991	28112	28043	27974	27399	26226	24432	23429	23230	23913	24553	25132	25595	25859	25824	25361	25011	24880	24886
9,479	18824	19230	19648	20015	20312	21129	21814	22543	22987	24186	25597	26982	27722	27972	27793	26955	25525	23735	22829	22941	24326	25796	27065	27591	27622	27206	26665	26358	26383	26457
9,956	17430	17607	17697	17727	17858	18516	19213	19980	20591	21866	23467	25173	26370	26938	26911	26200	25068	23623	23057	23464	25278	27100	28612	29049	29045	28562	28052	27604	27434	27355
10,49	17242	17331	16847	16157	15589	16335	17434	18693	19449	20486	21816	23560	25070	25972	25642	24714	23594	22941	23065	23935	25835	27542	28899	29423	29893	29989	29452	28520	27629	27259
10,964	17538	17710	17342	16631	15909	16240	17111	18204	18946	19632	20545	22102	23729	24898	24858	24289	23695	23450	23853	24727	26507	27982	29080	29573	30263	30804	30636	29728	28504	27845
11,508	17822	18076	17652	16818	15861	16262	17235	18474	19182	19680	20358	21588	23089	24236	24144	23520	22951	23368	24366	25656	27097	28229	28981	29461	30224	31019	31170	30419	29143	28359

Tabla D.13. Datos mapa magnético plataforma *P4* componente Z (nT).

Y/X	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5
0	55104	53095	53079	54164	54795	53876	52139	49981	48709	49142	52180	54890	55801	55512	54187	53265	53336	53659	53436	54296	55354	57302	58849	59927	60174	60545	61656	61587	61593	61623
0,491	54444	51909	51831	53185	53293	51521	49447	47499	46856	46645	50100	53998	57411	57688	56098	53832	52903	52907	54069	55356	56530	56668	58295	59281	60390	61121	62185	62074	61969	61942
0,988	53009	50508	50466	50474	49750	47723	45737	44286	43914	45653	49286	53791	57303	58097	56668	54036	52885	52551	53308	54571	55540	56325	58154	58909	58995	59812	60969	62469	62481	62639
1,491	53066	50959	50131	48942	46965	45524	44373	43491	43249	43865	47103	51649	55775	57670	57175	55794	54291	53104	53099	53746	54025	53773	55750	57461	58843	59351	60159	61705	61688	61739
1,974	52893	50985	49319	47414	44845	43445	43932	43761	43201	42905	46385	51106	56606	58394	58613	58564	57245	55475	54046	53658	52841	52630	55352	58367	58829	59617	60918	61437	61387	61376
2,481	52516	51118	49221	47548	43981	42598	41784	42502	41457	43069	46446	51177	54760	56351	56585	57371	56739	54782	52838	51178	49977	50032	52581	55170	55426	56939	59404	61989	61971	62042
2,992	53131	53086	51149	46397	43096	42062	44233	45390	44762	43596	46239	50051	54359	56122	56653	55688	54992	53262	50850	48426	47526	47423	49235	51176	52846	55363	58244	60203	61399	61517
3,472	48080	48255	47117	44642	42327	42533	44796	45592	44822	44206	46307	49126	51300	53080	53673	52644	51455	49921	47644	45356	44831	44583	45450	46344	47847	51202	54470	57531	59850	61471
3,999	43527	44585	44814	44624	42921	43712	46150	46609	45063	44632	46695	49523	49694	51129	51607	50854	48325	46142	44027	42400	42219	42102	42476	43191	43958	47126	50999	54714	57666	60467
4,506	44919	46225	46679	44576	43013	42541	44372	44717	43052	40900	43063	46143	48079	49132	49501	48819	46037	43488	41627	40247	40103	39270	39880	41137	43039	45882	49817	52187	56074	60233
4,971	48720	48619	48819	48463	46177	43384	42240	42563	41419	40624	42195	45057	46045	47044	47220	46512	44462	42127	40514	39077	37938	37156	38356	39855	40652	44005	48262	50746	53908	56806
5,493	52650	52180	51764	52251	48472	43223	40245	39406	38952	38406	39549	41544	43653	44433	44525	43298	41926	40311	38090	36470	34722	33920	35664	37151	38696	42317	46757	49600	51898	53006
5,969	57420	56948	55991	54848	51853	45968	40013	37493	37315	37782	38270	38158	38724	38883	38918	38872	39021	38169	36253	34263	32383	32000	33846	35847	39068	42337	46258	48626	50284	49794
6,497	57416	55516	54178	54810	53522	49798	44520	40541	38897	39052	38699	36877	37003	35982	36227	37857	39517	39078	35849	33513	31697	32027	33921	35653	37768	40613	43739	45963	47664	46353
7	57367	54608	52878	53810	53645	52175	49187	45281	41618	39970	39050	37892	37894	36328	35415	38057	41881	42201	38245	34705	32149	32541	33225	33869	35391	37827	40843	43298	45176	43723
7,497	57525	54249	52534	52684	52694	51716	50862	48314	44831	43213	40985	40046	38669	37153	34958	36800	41839	44155	41785	37176	33080	31935	31559	31454	31650	34253	37800	41306	43097	41883
7,956	57095	54023	53005	52375	52550	51545	52581	51459	49629	44876	41582	39534	38898	37156	34324	37151	42580	45839	44873	40776	35839	33206	31995	30730	30092	32676	37165	39982	40713	39757
8,475	54878	52880	52483	53922	54376	53725	52969	52464	51935	50630	47060	43931	42533	39816	37256	38236	42957	46192	44429	40424	35310	32650	30752	29850	29235	32663	37663	40395	40514	39630
8,997	54317	53191	53639	55179	55791	55131	53933	53308	53250	53510	50955	47250	43127	40013	37522	39863	43844	45320	45720	42291	37474	32208	29936	29297	30533	34845	39478	42501	42745	41557
9,479	53670	52794	53995	55804	56453	55713	54080	52625	52251	52529	51702	48942	45743	42385	40313	41366	43972	43854	42290	39175	35087	31577	29743	29699	33564	37006	41366	42694	43604	43101
9,956	51930	51564	52868	54703	55448	54831	52226	49289	48978	50794	51357	49737	48285	45036	42950	44782	45779	43961	40612	37969	35079	32789	31995	32404	34498	37212	40894	43496	45122	45614
10,49	49990	49549	50240	51438	52654	52694	50212	46867	46731	49469	52033	51542	48561	45099	42741	43401	43712	40918	40327	38588	37154	33409	32781	33012	36309	39401	42292	44538	46124	46867
10,964	48578	48390	48576	49832	49763	49615	47191	44928	44651	46962	50081	50717	48385	44940	42413	44099	43590	40576	37760	36585	36020	34730	33021	33165	38000	42199	44015	45594	46517	47052
11,508	47320	48108	48314	47501	46878	46288	45025	43269	43094	44543	47308	48477	48527	46138	43620	43236	42163	39496	37437	36317	36603	35799	32937	31891	38135	44117	46413	46894	46361	46077

Tabla D.14. Datos mapa magnético plataforma de referencia componente X (nT).

Y/X	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5
0	-22080	-15960	-13080	-11520	-10680	-10080	-9240	-8280	-6960	-5160	-4800	-4200	-3480	-3960	-3360	-2880	-1200	720	2400	4440	7440	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,491	-21120	-15240	-12120	-11520	-9720	-9960	-9480	-8640	-7320	-5640	-4920	-3840	-3120	-3960	-4080	-2640	-1320	480	2280	4320	7080	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,988	-18720	-14040	-12120	-10680	-10560	-10200	-9960	-9600	-7920	-5760	-4560	-3600	-4200	-3960	-4200	-2760	-1680	240	2040	3840	6360	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,491	-17040	-12600	-11280	-10920	-10800	-10440	-10680	-9840	-8280	-6240	-5160	-3720	-4320	-4080	-4440	-3840	-2160	-360	1680	3360	5880	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,974	-15480	-12120	-10920	-10440	-10560	-10800	-10800	-10080	-8280	-5880	-5520	-4080	-3960	-4440	-4320	-4200	-3240	-600	1200	3000	5520	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,481	-14520	-11640	-10560	-9960	-10320	-11280	-10560	-10080	-8160	-5880	-5160	-4320	-4560	-4560	-4680	-4320	-3960	-1680	240	2160	4320	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,992	-13080	-10800	-9360	-9600	-10080	-10920	-10800	-9960	-7800	-5880	-5040	-4800	-5040	-5160	-4920	-5040	-4440	-3000	-1080	1320	3120	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,472	-12480	-9840	-9240	-9360	-10320	-10920	-10440	-10080	-7320	-5880	-5280	-5160	-5280	-5160	-5280	-5280	-5160	-4080	-2040	480	3000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,999	-11640	-9360	-9000	-9360	-9720	-10200	-10080	-9240	-7560	-6000	-5880	-5520	-5280	-4680	-4920	-5400	-5400	-4440	-2880	-600	1800	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,506	-10800	-8760	-9120	-8640	-8760	-9600	-9600	-8760	-8040	-6960	-6240	-5160	-4440	-3840	-4440	-5160	-5520	-5280	-4080	-1920	840	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,971	-9600	-8760	-9120	-8880	-8640	-8640	-9120	-8520	-8160	-6840	-5760	-5520	-4440	-3720	-4200	-5280	-5760	-5520	-5040	-3240	-840	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,493	-9600	-9000	-8880	-8280	-8040	-7320	-7800	-7920	-7440	-6240	-5520	-5640	-5400	-4800	-5040	-5520	-5760	-5880	-5280	-3960	-1680	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,969	-8280	-8280	-7560	-7920	-7680	-6960	-7440	-7560	-6960	-5640	-5760	-6000	-5160	-5520	-5640	-5520	-5880	-5640	-5520	-4200	-2280	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,497	-7440	-7080	-7560	-7320	-7080	-7680	-8040	-7200	-6360	-5640	-6120	-6120	-6240	-6240	-5760	-5760	-6120	-5760	-5400	-4320	-3000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	-6720	-5520	-6240	-6120	-7320	-7320	-7800	-6960	-6360	-5640	-6360	-6480	-6000	-6600	-5760	-5640	-6240	-6240	-5520	-4320	-3360	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,497	-6120	-5640	-5160	-5520	-6720	-7440	-7320	-6600	-6720	-6120	-6240	-6120	-6120	-6120	-5880	-5640	-6240	-6480	-5640	-4320	-3720	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,956	-5400	-4920	-4560	-5760	-7200	-6960	-7200	-6480	-6840	-7080	-7200	-6480	-5640	-6000	-5400	-4800	-6000	-6000	-5400	-4080	-4080	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8,475	-5520	-4560	-4800	-5760	-6720	-7080	-7320	-6360	-6720	-7080	-7920	-6480	-5160	-6120	-5520	-3960	-5520	-6000	-5280	-4680	-4080	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8,997	-4680	-4560	-4800	-5640	-6960	-6360	-6240	-5760	-6000	-6840	-8160	-7560	-5400	-6000	-5880	-4920	-4800	-5400	-5400	-5160	-4680	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9,479	-4560	-4080	-4920	-5880	-6600	-5760	-5400	-4560	-5520	-6960	-7560	-7080	-5520	-6480	-6600	-5760	-5280	-5400	-4680	-4440	-5040	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9,956	-4200	-4200	-5280	-5880	-6120	-5160	-4920	-4560	-5880	-6840	-7320	-6600	-5520	-6240	-7800	-7080	-6000	-5040	-4680	-4680	-4800	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10,49	-3840	-3960	-5160	-5160	-5640	-5040	-4200	-4440	-6240	-6720	-6720	-6360	-6000	-6360	-7440	-7200	-6480	-5520	-4560	-4920	-5040	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10,964	-3720	-4080	-4800	-5040	-5760	-5040	-4560	-5280	-6480	-6840	-6360	-6360	-5880	-6960	-7440	-8160	-7200	-5760	-4440	-4920	-5400	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11,508	-3480	-3840	-4680	-5160	-5880	-5160	-5040	-5640	-6480	-7200	-6480	-6000	-6120	-6240	-7200	-7920	-8040	-6240	-4320	-5160	-6000	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla D.15. Datos mapa magnético plataforma de referencia componente Y (nT).

Y/X	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5
0	21600	21000	20880	21120	20040	20520	21000	21240	21360	22440	21000	21360	21480	21600	21720	22560	22920	23040	23040	23040	23640	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,491	19680	17880	18120	18360	18000	18120	18840	19440	19680	19560	20040	20160	20160	20280	20400	21000	21600	21840	21840	22200	22680	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,988	18720	17040	16560	16680	15960	17040	17160	17880	18480	18840	18360	18960	19080	19320	19080	20400	20760	21360	21240	21840	22440	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,491	17760	16320	16080	15840	15720	16320	16560	17280	17400	17640	17160	17520	18120	18360	18240	19320	20160	20640	21120	21960	22560	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,974	17880	16560	15840	15720	15360	15840	15600	15960	15840	15720	15720	16200	16440	16680	16560	17640	18240	19320	20160	21000	21960	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,481	17520	16800	15840	15600	15240	15360	15720	15000	15120	14760	14520	14760	15240	15720	15960	16440	17160	17880	19200	20400	21360	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,992	17400	16560	16080	15480	15360	15120	15120	14520	14520	13920	13920	14040	14640	14880	15240	15600	15960	16560	18240	19200	20160	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,472	17160	16200	15720	15720	15480	15000	14760	14280	13680	13440	13680	14400	14760	14640	14280	14520	14760	15360	16440	17520	18720	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,999	16800	16320	15840	16320	15360	15000	14280	13680	13560	13800	14400	14400	14520	13920	13200	13200	13560	13800	14640	16080	17760	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,506	16920	16320	16200	16560	15840	14760	13920	13440	13440	13800	13800	14040	13680	13080	12840	12840	12840	13200	13920	15480	17160	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,971	16800	16560	16200	16320	15720	15240	13920	13800	12960	12720	12360	12600	12600	13080	13440	13680	13680	14040	14520	15360	16560	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,493	17160	16800	16200	16080	15960	15480	14520	14040	13440	12480	12120	12240	12720	13560	14280	14880	15120	15240	15240	15720	16320	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,969	18360	17760	16560	16080	15360	15240	15000	14640	13800	13440	13320	13440	13680	14760	15360	15720	15840	15720	15240	15720	16200	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,497	19920	18960	17280	16320	15480	15240	15360	15360	15000	14760	14640	14760	15120	15240	15480	15840	15480	15840	16080	16080	16440	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	19800	19320	18240	17400	16440	16680	16440	16200	16080	16200	16200	16320	16560	16440	15960	16320	15960	16320	16560	16440	16800	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,497	19200	18840	18240	18000	17640	17400	16920	16800	16920	17280	17880	18240	18000	17760	17640	17160	16920	17040	16560	16200	16560	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,956	19440	18960	18360	18000	18000	18000	17880	17760	17880	18240	18600	19200	19320	18720	18600	18240	17640	17280	16680	16920	17280	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8,475	20400	19920	20040	20280	20160	19560	19080	19080	18480	18240	18360	18840	19080	18960	19080	19440	18960	18240	18240	18360	18960	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8,997	21600	21600	21600	22080	21360	21000	20640	19800	19320	18960	18480	17880	18600	18840	19440	20640	21000	20640	20280	20400	20640	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9,479	22440	22440	22200	22080	21240	21480	21000	20640	20280	20280	19320	18840	18840	18960	19560	21000	21960	22080	21960	21360	21360	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9,956	22200	22200	22080	21600	21240	21480	20640	20520	20760	20760	20160	19800	19800	19560	19800	20400	21360	21960	21720	21600	21480	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10,49	21840	21600	21600	21120	20760	20640	20640	20640	21120	21120	21000	20760	20880	20880	20880	20640	21120	21480	21720	21840	21840	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10,964	21720	21240	21240	20640	20520	20760	20400	21240	21480	21720	21360	21240	21480	21360	21240	20880	21480	22320	22200	22440	22560	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11,508	21600	21360	20760	20280	19920	20760	21840	22320	22320	22080	22200	22200	22320	21600	21360	21000	21480	22320	22680	23160	24240	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla D.16. Datos mapa magnético plataforma de referencia componente Z (nT).

Y/X	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	
0	68280	67680	66120	63960	63120	62160	61680	61080	60000	57600	57120	56400	55560	55080	55440	56400	56520	55920	55200	54360	52680	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,491	64560	64200	63000	60840	60000	59160	58800	58800	58320	56160	55680	55080	54000	53640	54240	55200	55320	54600	53880	52920	51360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,988	61920	60600	59520	57840	56880	56400	56760	57120	57120	55200	54840	54000	52920	52440	53040	54120	54480	53640	52920	51960	50280	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,491	59280	58080	56400	54960	54240	54120	54720	55560	56160	54240	54000	53280	51960	51600	52080	53160	53760	53520	52560	51360	50040	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,974	57120	55560	53880	52560	52080	52080	53280	54840	54960	53040	52800	51960	51000	50520	50880	52200	53160	53400	52440	51480	50400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,481	55320	53520	52200	50640	50160	50280	51480	52800	53400	51480	51120	50280	49440	48840	49200	50880	51840	52800	52080	51240	50640	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,992	54120	52200	50520	48600	48120	48720	49800	51240	51480	49440	48480	47640	47040	47160	47880	49440	50520	51600	51720	51240	50880	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,472	52560	51000	48960	47040	46680	47040	48480	49560	49920	47400	46440	45840	45840	46080	46680	48000	48840	50280	51120	50880	50400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,999	50880	49080	47160	45480	45720	45840	46920	48120	48120	45600	45120	45120	45120	44880	45000	45960	46680	48240	49320	49560	49200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,506	49320	47400	45960	44880	44880	44760	45240	45960	46200	44640	45000	44760	44400	43440	42600	43080	43920	45360	46680	47640	48120	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,971	47760	45840	45000	44280	43920	43560	43560	43800	44520	43320	43560	43320	42840	41400	40320	40560	41400	42600	44280	45840	46800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,493	45960	44280	43800	43560	43320	42600	42120	42120	42360	40800	40320	40320	40080	39720	39000	39600	40080	41280	42840	44280	45360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5,969	44760	42960	42600	42120	42240	41400	40920	40800	40680	38160	37560	37680	38040	38280	38280	39120	39720	40680	41880	42840	43800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6,497	44760	42600	41280	40680	40320	39600	39480	39600	39240	36480	36000	36240	36480	37200	37680	38520	39120	39840	40800	41520	42360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	45240	42720	40800	39360	38520	38040	38280	38520	38040	35640	35400	35400	35280	36000	36600	37200	37680	38760	39960	40800	41400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,497	44520	42480	40320	38640	37920	37560	37680	37560	36960	35040	35400	35520	35280	35640	35760	36120	36480	37800	39240	39840	40200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7,956	43320	41160	39120	37320	36960	36720	36600	36600	36360	34440	36000	36600	36000	35880	36600	35760	35640	36960	37800	37920	38160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8,475	42960	40080	37800	36360	36360	36000	36000	36240	35880	34080	36000	37320	36600	36120	36240	35640	34680	35520	36000	36360	36960	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8,997	42480	39720	37800	37560	37680	36720	36240	36240	35160	33120	34680	36600	36240	36000	36480	36240	35160	35040	35640	36000	37080	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9,479	43080	40200	38760	38640	38640	37440	37200	36360	34800	32520	34200	35280	35280	34920	36000	37320	36840	36480	36480	36720	37920	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9,956	43680	40920	39480	39360	39000	37920	37440	36000	34800	33360	34080	34800	34320	33960	35160	37560	37920	37920	37560	37200	38280	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10,49	43680	40920	39720	39360	38880	38040	37200	35640	34680	33720	34200	34440	33960	33720	34560	37200	38040	38040	37680	37080	38160	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10,964	43440	41040	39600	39000	38160	37320	36480	34680	34560	33720	34560	34560	34320	34080	34680	36840	38280	38520	37920	37080	38040	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11,508	43200	40560	39120	38280	37680	36840	35640	34560	34320	33840	34680	34800	34680	34800	34800	36600	38280	39360	38400	37440	38280	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Apéndice E

Publicaciones relacionadas con las tesis

En este apéndice se recogen las publicaciones relevantes en revistas y congresos, tanto internacionales como nacionales, que están relacionadas con el trabajo realizado en la tesis.

E.1 Publicaciones en revistas

1. A. Villalba Madrid, A. Álvarez Melcón. “Using genetic algorithms for compensating the local magnetic perturbation of a ship in the earth’s magnetic field”. Microwave and optical technology letters. Vol. 47, No. 3, pp. 281-286, 2005.

2. A. Villalba Madrid, A. Álvarez Melcón. “Process for compensating local magnetic perturbations on ferromagnetic surfaces”. Journal of electromagnetic analysis and applications, 2012, 4, 397-399. DOI: 10.4236/jemaa.2012.410054 Published Online October 2012 (<http://www.SciRP.org/journal/jemaa>).

3. A. Villalba Madrid. “La magnetización de un buque y su medida”. Boletín Técnico de Ingeniería de la Armada nº 4 julio 2013. Pp. 13-22.

4. A. Villalba Madrid. “Método avanzado de optimización de firmas magnéticas basado en algoritmos genéticos”. Boletín Técnico de Ingeniería de la Armada nº 6 julio 2014. Pp. 44-51.

5. A. Villalba Madrid. “Modelo magnético para el estudio de anomalías magnéticas en cubiertas de vuelo de plataformas navales”. Boletín Técnico de Ingeniería de la Armada nº 8 julio 2015. Pp 4-12.

E.2 Publicaciones en congresos

E.2.1. Publicaciones en congresos nacionales

1. A. Villalba Madrid, A. Álvarez Melcón, “Sistema para la Desmagnetización de Barcos basado en Algoritmos Genéticos”. XX Symposium URSI 2005 Gandía.

2. A. Villalba Madrid, A. Álvarez Melcón. “Análisis y compensación de anomalías magnéticas en cubiertas de vuelo de plataformas navales”. Congreso nacional de I+D en Defensa y Seguridad 2013. 6-7 noviembre 2013. Pp. 125-134.

E.2.2. Publicaciones en congresos internacionales

1. A. Villalba Madrid, A. Álvarez Melcón. “Analysis and compensation of magnetic anomalies on vessel's flight decks”. V International Conference on Computational Methods in Marine Engineering MARINE 2013. Hamburgo 29-31 mayo 2013. Pp. 806-817.

Bibliografía

- [1] John J. Holmes , “Exploitation of a Ships Magnetic Fields”, *Morgan & Claypool Publishers Series, First Edition 2006*, DOI: 10.2200/S00340ED1V01Y200605 CEM009.
- [2] Timothy Malcolm Baynes, “Analisis of the Demagnetisation Process and Possible Alternative Magnetic Treatments for Naval Vessels”, *Thesis for the degree of doctor of Philosophy in the School of Physics, Faculty of Science at The University of New South Wales. February 2002*.
- [3] D.S. Weile, E. Michielssen, “Genetic Algorithm Optimization Applied to Electromagnetics: A Review”, *IEEE Transaction On Antennas And Propagation*, Vol. 45, No. 3, March 1997.
- [4] G. Fuat Üler, O.A. Mohammed, Chang-Seop Koh, “Utilizing Genetic Algorithms for the Optimal Design of Electromagnetic Devices”, *IEEE Transaction On Magnetics*, Vol. 30, No. 6, November 1994.
- [5] J.A. Vasconcelos, L. Krähenbühl, L. Nicolas, A. Nicolas, “Design Optimization Using the BEM Coupled With Genetic Algorithm”.
- [6] G. Harik, E. Cantú-Paz, D.E. Goldberg, B.L. Miller, “The Gambler’s Ruin Problem, Genetic Algorithms, and the Sizing of Population”.
- [7] D.E. Goldberg, “Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning”. *Adisson-Wesley Professional; 1 edition (January, 1989)*.
- [8] Meng-Hong Chen, Yang-Han Lee, “A Genetic Algorithm for the Central Code Controller of the FO-CDMA Network”, *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 23, No. 1, October 5 1999.
- [9] Chen Xudong, Qian Jingen, Ni Guangzheng, Yang Shiyu, Zhang Mingliu, “An Improved Genetic Algorithm for Global Optimization of electromagnetic Problems”, *IEEE Transaction On Magnetics*, Vol. 37, No. 5, September 2001.
- [10] Salvatore Alfonzenti, Emanuele Dilettoso, Nunzio Salerno “A Proposal for a Universal Parameter Configuration for Genetic Algorithm Optimization of Electromagnetic Devices”, *IEEE Transaction On Magnetics*, Vol. 37, No. 5, September 2001.

-
- [11] Osama A. Mohammed, "GA Optimization in Electric Machines", *IEEE* 1997.
- [12] X. Brunotte, G. Meunier, J.P. Bongiraud, "Ship Magnetizations Modelling by the Finite Element Method", *IEEE Transaction On Magnetics*, Vol. 29, No. 2, March 1993.
- [13] Keiichi Mori, "Exponentially Decreasing Error Model in approximating Measured Magnetic Field of a Body", *IEEE Transaction On Magnetics*, Vol. 24, No. 2, September 1988.
- [14] John J. Holmes, "Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures", *Morgan & Claypool Publishers Series, First Edition* 2008, DOI: 10.2200/S00150ED1Y200809CEM023.
- [15] F. Le Dorze, J.P. Bongiraud, J.L. Coulomb, P. Labie, X. Brunotte, "Modeling of Degaussing Coils Effects in Ships by the Method of Reduced Scalar Potencial Jump", *IEEE Transaction On Magnetics*, Vol. 34, No. 5, September 1998.
- [16] X. Brunotte, G. Meunier, "Line Element for Efficient Computation of the Magnetic Field Created by Thin Iron Plates", *IEEE Transaction On Magnetics*, Vol. 26, No. 5, September 1990.
- [17] D. Rogers, P.J. Leonard, H.C. Lai, "Surface Elements For Modelling 3D Fields Around Thin Iron Sheets", *IEEE Transaction On Magnetics*, Vol. 29, No.25, March 1993.
- [18] F. Thollon, N. Burais, "Geometrical Optimization of Sensors for Eddy Currents Non Destructive Testing and Evaluation", *IEEE Transaction On Magnetics*, Vol. 31, No. 3, May 1995.
- [19] H.T. Yu, K.R. Shao, "A Finite Element Method For Computing 3D Eddy Current Problems", *IEEE Transaction On Magnetics*, Vol. 32, No. 5, September 1996.
- [20] Keiichi Mori, "Application of Weight Functions to the Magnetic Localization of an Object", *IEEE Transaction On Magnetics*, Vol. 25, No. 3, September 1989.
- [21] Potts, W. C., "The Magnetic Field of a Ship and its Neutralization by Coil Degaussing", *General Journal of the Institution of Electrical Engineers – Part I*, Vol. 93, No. 71, 1946, pp. 488-499.
- [22] A. Villalba Madrid, A. Álvarez Melcón, "Using Genetic Algorithms for Compensating the Local Magnetic Perturbation of a Ship in the Earth's Magnetic Field", *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 47, N° 3, November 2005.
- [23] Roald k. Wangness, "Campos electromagnéticos" 2ª Edición. ISBN 968-18-1316-2.
- [24] John J. Holmes, "Modeling a Ship's Ferromagnetic Signatures", *Morgan & Claypool Publishers Series, First Edition* 2007, DOI: 10.2200/S00092ED1V01Y200706CEM016.
- [25] <http://www.ign.es/ign/layoutIn/visorgeomagnetismo.do>
-

Índice de Figuras

Figura 1.1. Fragata <i>Álvaro de Bazán</i> en la estación de <i>deperming</i> de Lambert Point.....	2
Figura 2.1. Curva de histéresis de un material ferromagnético.	10
Figura 2.2. Sistema de referencia magnético de un buque.	13
Figura 2.3 Medida de la magnetización permanente del buque.	16
Figura 2.4 Medida de la magnetización inducida del buque.	17
Figura 2.5. Dipolo magnético real.	21
Figura 2.6. Medida del campo magnético producido por un buque modelizado por un dipolo magnético vertical.	25
Figura 2.7. Dipolo magnético vertical ($m_z=100\text{A.m}^2$; $d=9\text{m}$) medido por una base lineal de sensores verticales.....	26
Figura 2.8. Dipolo magnético vertical ($m_z=100\text{A.m}^2$; $d=9\text{m}$) medido por una base lineal de sensores horizontales transversal.	26
Figura 2.9. Dipolo magnético vertical ($m_z=100\text{A.m}^2$; $d=9\text{m}$) medido por una base lineal de sensores horizontales longitudinales.....	27
Figura 2.10. Dipolo magnético longitudinal medido por una base lineal de magnetómetros triaxiales.....	28

Figura 2.11. Dipolo magnético longitudinal ($m_y=100\text{A.m}^2$; $d=9\text{m}$) medido por una base lineal de sensores verticales.....	29
Figura 2.12. Dipolo magnético longitudinal ($m_y=100\text{A.m}^2$; $d=9\text{m}$) medido por una base lineal de sensores horizontales longitudinales.....	29
Figura 2.13. Dipolo magnético longitudinal ($m_y=100\text{A.m}^2$; $d=9\text{m}$) medido por una base lineal de sensores horizontales transversales.....	30
Figura 2.14. Dipolo magnético transversal medido por una base lineal de magnetómetros triaxiales.....	31
Figura 2.15. Dipolo magnético transversal ($m_x=100\text{A.m}^2$; $d=9\text{m}$) medido por una base lineal de sensores verticales.....	31
Figura 2.16. Dipolo magnético transversal ($m_x=100\text{A.m}^2$; $d=9\text{m}$) medido por una base lineal de sensores horizontales longitudinales.....	32
Figura 2.17. Dipolo magnético transversal ($m_x=100\text{A.m}^2$; $d=9\text{m}$) medido por una base lineal de sensores horizontales transversales.....	32
Figura 2.18. Firmas magnéticas de dipolos verticales, horizontales y transversales.....	33
Figura 3.1. Orientación de las bobinas de <i>degaussing</i> tipo <i>V</i> , <i>L</i> y <i>T</i>	36
Figura 3.2. Sentido positivo del campo magnético producido por las bobinas de un <i>SDG</i>	38
Figura 3.3. Espira plana <i>XY</i>	39
Figura 3.4 Inducción magnética de una espira plana <i>XY</i> (B_x , B_y , B_z).	43
Figura 3.5. Hilo finito de corriente.	44
Figura 4.1. Mecanismo de selección según la probabilidad de adaptación.	54
Figura 4.2. Escalado Truncado Sigma Inverso.	56
Figura 4.3. Escalado exponencial.	57
Figura 4.4. Convergencia de las soluciones utilizando <i>mínimos cuadrados</i> y <i>Contención</i>	58
Figura 4.5. Algoritmo Genético utilizado en la compensación magnética.	59
Figura 4.6. Mecanismo de compensación magnética de un buque utilizando <i>GAS</i>	61

Figura 4.7 Aplicación de los algoritmos genéticos al <i>SDG</i> de un buque.	63
Figura 4.8. Firma de quilla de la magnetización transversal medida por el sensor MG5..	64
Figura 4.9. Componente B_z de los efectos bobina V	65
Figura 4.10. Componente B_z de los efectos bobina L	65
Figura 4.11. Firma magnética B_z del modelo buque a rumbo norte magnético.	66
Figura 4.12. Firma magnética B_z del modelo buque a rumbo sur magnético.	66
Figura 4.13. Evolución <i>LIRWC</i> para $c \in \{1, 1, 1, 5, 2, 2, 5, 3, 0\}$	67
Figura 4.14. Evolución <i>LIRTC</i> para $c \in \{1, 1, 1, 5, 2, 2, 5, 3\}$	68
Figura 4.15. Evolución <i>STIRWC</i> para $c \in \{1, 1, 5, 2, 2, 5, 3\}$	68
Figura 4.16. Evolución <i>STITC</i> para $c \in \{1, 1, 5, 2, 2, 5, 3\}$	69
Figura 4.17. Evolución <i>EIRWC</i> para $c \in \{0,003, 0,004, 0,005, 0,006, 0,007\}$	69
Figura 4.18. Evolución <i>EITC</i> para $c \in \{0,003, 0,004, 0,005, 0,006, 0,007\}$	70
Figura 4.19. Evolución comparativa para diferentes escalados.	70
Figura 4.20. Firma de quilla para la magnetización vertical y longitudinal permanente una vez compensada por el sistema de <i>degaussing</i>	71
Figura 4.21. Comparación entre la medida inicial de quilla, minimización mediante <i>GA</i> usando la función objetivo de mínimos cuadrados y el método de <i>Contención</i> después de 40 generaciones.	72
Figura 4.22. Comparación entre el gradiente del campo magnético medido en quilla para la firma inicial y los resultados de optimización mediante <i>GA</i> usando la función objetivo de mínimos cuadrados y contorno después de 40 generaciones.	73
Figura 5.1. Sensor Magnético Tipo 1.	76
Figura 5.2. Sensor Magnético Tipo 2.	77
Figura 5.3. Esquema caja de conexionado sensor Tipo 1.	78
Figura 5.4. Caja de conexionado sensor Tipo 1.	78
Figura 5.5. Sistema de medida con magnetómetro triaxial.	79

Figura 5.6. Cabezal de orientación y soporte de nivelación.....	80
Figura 5.7. Sistemas de referencia de medida y de la plataforma.	81
Figura 5.8. Componente Longitudinal Campo Magnético Plataforma <i>PI</i>	82
Figura 5.9. Componente transversal magnético plataforma <i>PI</i>	83
Figura 5.10. Componente vertical magnética de la plataforma <i>PI</i>	84
Figura 5.11. Error de rumbo de la plataforma <i>PI</i> a 1 metro de la superficie.	85
Figura 5.12. Zonas de evaluación dentro de la superficie muestreada.	87
Figura 5.13. Zonas de estudio de la componente magnética longitudinal a 1 metro de la superficie de la Plataforma <i>PI</i>	88
Figura 5.14. Zonas de estudio de la componente magnética transversal a 1 metro de la superficie de la Plataforma <i>PI</i>	89
Figura 5.15. Zonas de estudio de la componente magnética vertical a 1 metro de la superficie de la Plataforma <i>PI</i>	90
Figura 5.16. Zonas de estudio del error de rumbo magnético a 1 metro de la superficie de la Plataforma <i>PI</i>	91
Figura 5.17. Promediado del mapa magnético por filas a rumbo 330° de la plataforma <i>PI</i> dentro de la zona <i>Z3</i>	96
Figura 5.18. Promediado del mapa magnético por columnas de la plataforma <i>PI</i> dentro de la zona <i>Z3</i>	97
Figura 5.19. Error de rumbo promediado de la plataforma <i>PI</i> en la zona <i>Z3</i>	98
Figura 6.1. Diagrama de bloques de la plataforma multisensor.	101
Figura 6.2. Plataforma no magnética para el mapeo de superficies.	102
Figura 6.3. Diagrama de bloques del software de captura.....	103
Figura 6.4. Pantalla de captura de datos del software de captura de datos magnéticos.	104
Figura 6.5. Cambio de sistema de referencia del equipo de medida al de la plataforma.	106
Figura 6.6. Componente transversal campo magnético plataforma <i>P2</i>	108
Figura 6.7. Componente longitudinal campo magnético plataforma <i>P2</i>	109

Figura 6.8. Componente vertical campo magnético plataforma <i>P2</i>	110
Figura 6.9. Error de rumbo en la plataforma <i>P2</i>	111
Figura 6.10. Zonas de estudio de la componente magnética transversal en la plataforma <i>P2</i>	112
Figura 6.11. Zonas de estudio de la componente magnética longitudinal en la plataforma <i>P2</i>	113
Figura 6.12. Zonas de estudio de la componente magnética vertical en la plataforma <i>P2</i>	114
Figura 6.13. Zonas de estudio del error de rumbo magnético a 1 metro de la superficie de la plataforma <i>P2</i>	115
Figura 6.14. Promediado mapa magnético por filas plataforma <i>P2</i>	118
Figura 6.15. Promediado mapa magnético por columnas plataforma <i>P2</i>	118
Figura 6.16. Error de Rumbo Promediado Plataforma <i>P2</i>	119
Figura 6.17. Componente transversal campo magnético plataforma <i>P3</i>	122
Figura 6.18. Componente longitudinal del campo magnético en la plataforma <i>P3</i>	123
Figura 6.19. Componente vertical del campo magnético en la plataforma <i>P3</i>	124
Figura 6.20. Error rumbo en la plataforma <i>P3</i>	125
Figura 6.21. Zonas de estudio de la componente magnética transversal en la plataforma <i>P3</i>	126
Figura 6.22. Zonas de estudio de la componente magnética longitudinal en la plataforma <i>P3</i>	127
Figura 6.23. Zonas de estudio de la componente magnética vertical en la plataforma <i>P3</i>	128
Figura 6.24. Zonas de estudio del error de rumbo en la plataforma <i>P3</i>	129
Figura 6.25. Promediado Mapa Magnético por Filas a Rumbo 360°.	131
Figura 6.26. Promediado Mapa Magnético por Columnas a Rumbo 360°.	132
Figura 6.27. Error de Rumbo Promediado a Rumbo 360°.	132
Figura 6.28. Componente transversal del campo magnético en la plataforma <i>P4</i>	134

Figura 6.29. Componente longitudinal del campo magnético en la plataforma <i>P4</i>	134
Figura 6.30. Componente vertical del campo magnético en la plataforma <i>P4</i>	135
Figura 6.31. Error de rumbo en la plataforma.	135
Figura 6.32. Zonas de estudio de la componente magnética transversal en la plataforma <i>P4</i>	136
Figura 6.33. Zonas de estudio de la componente magnética longitudinal en la plataforma <i>P4</i>	137
Figura 6.34. Zonas de estudio de la componente magnética vertical en la plataforma <i>P4</i>	138
Figura 6.35. Zonas de estudio del error de rumbo magnético en la plataforma <i>P4</i>	139
Figura 6.36. Promediado mapa magnético por filas a rumbo 360° en la plataforma <i>P4</i>	141
Figura 6.37. Promediado mapa magnético por columnas a rumbo 360° en la plataforma <i>P4</i>	141
Figura 6.38. Error de rumbo promediado en la Plataforma <i>P4</i>	142
Figura 7.1. Promediado por filas de la componente <i>X</i> (<i>PFX()</i>).....	146
Figura 7.2. Promediado por filas de la componente <i>Y</i> (<i>PFY(i)</i>).	147
Figura 7.3. Promediado por filas de la componente <i>Z</i> (<i>PFZ(i)</i>).	148
Figura 7.4. Promediado por columnas de la componente <i>X</i> (<i>PCX(j)</i>).	149
Figura 7.5. Promediado por columnas de la componente <i>Y</i> (<i>PCY(j)</i>).....	150
Figura 7.6. Promediado por columnas de la componente <i>Z</i> (<i>PCY(j)</i>).....	151
Figura 7.7. Error de rumbo promediado por Filas.	153
Figura 7.8. Error de rumbo promediado por columnas.	153
Figura 7.9. Evaluación de los promediados por filas y por columnas para dipolos transversales, longitudinales y verticales.....	155
Figura 7.10. Filas 2 a 10 del mapa magnético de la plataforma <i>P1</i> componente <i>Z</i>	161
Figura 7.11. Situación de las bobinas transversales y verticales utilizadas para la compensación de la anomalía magnética de la plataforma <i>P1</i>	162

Figura 7.12. Resultado de la compensación en la Simulación1.	163
Figura 7.13. Resultado de la compensación de la anomalía magnética en la plataforma <i>P1</i> con bobinas verticales.	164
Figura 7.14. Filas 10 a 15 de la componente vertical. mapa magnético de la plataforma <i>P4</i>	165
Figura 7.15. Plano de la zona <i>Z5</i> y la disposición de bobinas verticales de compensación.	166
Figura 7.16. Detalle de la situación de las 15 espiras verticales para la corrección del magnetismo permanente horizontal.	166
Figura 7.17. Resultado de la compensación de la anomalía tipo <i>ADE</i> en la plataforma <i>P4</i>	168
Figura A.1. Evolución curva de histéresis durante procedimiento <i>deperming</i>	177
Figura A.2. Esquema de bobinado longitudinal de un buque para someterlo a un <i>deperming</i>	178
Figura A.3. Tramos de cables para conformar las espiras del bobinado para realizar un <i>deperming</i>	178
Figura A.4. Preparación en el muelle de los tramos de espiras de una bobina de <i>deperming</i>	179
Figura A.5. Disposición sobre cubierta de las espiras de una bobina de <i>deperming</i>	179
Figura A.6. Detalle de los terminales de conexión de las espiras de una bobina de <i>deperming</i>	180
Figura A.7. Detalle de la conexión de las espiras de una bobina de <i>deperming</i>	180
Figura B.1. Esquema del mallado fino en las Plataformas medidas.	182
Figura B.2. Marcado de la matriz de 30 x 24 puntos de medida sobre la cubierta de vuelo de la plataforma <i>P1</i>	183
Figura B.3. Muestreo con dispositivo mono-sensor sobre la cubierta de vuelo de la plataforma <i>P1</i>	183
Figura B.4. Muestreo con dispositivo multi-sensor sobre cubierta de vuelo de plataforma <i>P2</i>	184

Figura B.5. Bobinado de una fuente magnética bajo la cubierta de vuelo de la plataforma <i>PI</i>	184
Figura C.1. Tarjeta de adquisición de datos externa NI DAQPad-6016.	186
Figura C.2. Encoder digital MTL MAS-42-4096-G5.....	187
Figura C.3. Sensor inclinación CXTA02 Crossbow Technology.	187

Índice de Tablas

Tabla 5.1. Valores máximo, mínimo y promedio de la inducción magnética en nanoTeslas.	92
Tabla 5.2. Valores máximo, mínimo y promedio del error de rumbo en grados.	92
Tabla 5.3. Valores de los parámetros GE(nT/m) y GMER (°/m) para la zona Z3.	95
Tabla 6.1. Formato del fichero ASCII de los datos grabados por el sistema multi-sensor.	104
Tabla 6.2. Valores máximo, mínimo y promedio de la densidad de flujo magnético..	116
Tabla 6.3. Valores máximo, mínimo y promedio del error de rumbo.	116
Tabla 6.4. Valores de los parámetros <i>GE</i> (nT/m) y <i>GMER</i> (°/m) para las zona Z3.	117
Tabla 6.5. Valores máximo, mínimo y promedio de la densidad de flujo magnético..	130
Tabla 6.6. Valores máximo, mínimo y promedio del error de rumbo en grados.	130
Tabla 6.7. Valores de los parámetros GEPF, GEPC, GMERPF y GMERFC para la zona Z3.	130
Tabla 6.8. Valores máximo, mínimo y promedio de la densidad de flujo magnético..	140
Tabla 6.9. Valores máximo, mínimo y promedio del error de rumbo en grados.	140
Tabla 6.10. Valores de los parámetros GEPF, GEPC, GMERPF y GMERFC para la zona Z3.	140

Tabla 7.1. Valores de los parámetros <i>DMPFX</i> y <i>GEFPX</i> para las cinco plataformas medidas.....	146
Tabla 7.2. Valores de los parámetros <i>DMPFY</i> y <i>GEFPY</i> para las cinco plataformas medidas.....	147
Tabla 7.3. Valores de los parámetros <i>DMPFZ</i> y <i>GEPFZ</i> para las cinco plataformas medidas.....	148
Tabla 7.4. Valores de los parámetros <i>DMPCX</i> y <i>GEPCX</i> para las cinco plataformas medidas.....	149
Tabla 7.5. Valores de los parámetros <i>DMPCY</i> y <i>GEPCY</i> para las cinco plataformas medidas.....	150
Tabla 7.6. Valores de los parámetros <i>DMPCZ</i> y <i>GEPCZ</i> para las cinco plataformas medidas.....	151
Tabla 7.7. Valores de los parámetros <i>VAEmax</i> , <i>PVAE</i> , <i>GMERPF</i> y <i>GMERPC</i> para las cinco plataformas medidas.	152
Tabla 7.8. Análisis de la forma de las curvas de promediado para cada componente de tres dipolos ideales de un solo componente.....	154
Tabla 7.9. Contribuciones cada tipo de dipolo a los valores de los parámetros <i>DM</i> y <i>GE</i> para cada componente.	156
Tabla 7.10. Valores referenciados de los parámetros <i>DM</i> y <i>GE</i> y umbrales para la clasificación de las anomalías.....	156
Tabla 7.11. Cuantificación de los dipolos presentes en cada Plataforma.....	157
Tabla 7.12. Valores referenciados de los parámetros <i>DM</i> y <i>GE</i> y umbrales para la clasificación de las anomalías.....	158
Tabla 7.13. Valores referenciados de los parámetros <i>DM</i> y <i>GE</i> y umbrales para la clasificación de las anomalías.....	158
Tabla 7.14. Valores referenciados del parámetro <i>GMER</i> y umbrales para la clasificación de las anomalías.....	159
Tabla 7.15. Clasificación de los diferentes tipos de anomalías en función de los valores de los parámetros <i>DM</i> , <i>GE</i> y <i>GMER</i>	159

Tabla 7.16. Clasificación de los diferentes tipos de anomalías en función de los valores de los dipolos que las producen.....	159
Tabla 7.17. Situación de las bobinas transversales por coordenadas de los puntos extremos de cada uno de los tramos (en metros).....	162
Tabla 7.18. Situación de las bobinas verticales por coordenadas de puntos extremos de cada uno de los tramos (en metros).	164
Tabla 7.19. Coordenadas de situación de las 15 bobinas verticales utilizadas en la compensación de la anomalía magnética Tipo <i>ADE</i> (en metros).....	167
Tabla 7.20. Valores <i>Amperio.Vuelta</i> de las bobinas de compensación de la anomalía magnética Tipo <i>ADE</i>	168
Tabla A.1. Comparativa entre <i>deperming</i> y <i>wiping</i>	175
Tabla D.1. Formato de fichero ASCII capturado por el software de captura automática.	190
Tabla D.2. Datos mapa magnético plataforma <i>P1</i> componente <i>X</i> (nT).....	191
Tabla D.3. Datos mapa magnético plataforma <i>P1</i> componente <i>Y</i> (nT).....	192
Tabla D.4. Datos mapa magnético plataforma <i>P1</i> componente <i>Z</i> (nT).....	193
Tabla D.5. Datos mapa magnético Plataforma <i>P2</i> componente <i>X</i> (nT).	194
Tabla D.6. Datos mapa magnético Plataforma <i>P2</i> componente <i>Y</i> (nT).....	195
Tabla D.7. Datos mapa magnético Plataforma <i>P2</i> componente <i>Z</i> (nT).....	196
Tabla D.8. Datos mapa magnético plataforma <i>P3</i> componente <i>X</i> (nT).....	197
Tabla D.9. Datos mapa magnético plataforma <i>P3</i> componente <i>Y</i> (nT).....	198
Tabla D.10. Datos mapa magnético plataforma <i>P3</i> componente <i>Z</i> (nT).....	199
Tabla D.11. Datos mapa magnético plataforma <i>P4</i> componente <i>X</i> (nT).....	200
Tabla D.12. Datos mapa magnético plataforma <i>P4</i> componente <i>Y</i> (nT).....	201
Tabla D.13. Datos mapa magnético plataforma <i>P4</i> componente <i>Z</i> (nT).	202
Tabla D.14. Datos mapa magnético plataforma de referencia componente <i>X</i> (nT).	203
Tabla D.15. Datos mapa magnético plataforma de referencia componente <i>Y</i> (nT).....	204
Tabla D.16. Datos mapa magnético plataforma de referencia componente <i>Z</i> (nT).....	205